



TUGAS AKHIR - TE141599

**PERANCANGAN KONTROLER PI DENGAN TEKNIK MRAC
UNTUK PENGATURAN *LEVEL* PADA *COUPLED TANKS***

Fahd Farras Mahmod
NRP 2212 100 102

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT.
Mochammad Sahal, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***PI CONTROLLER DESIGN USING MRAC TECHNIQUE FOR LEVEL
CONTROL ON COUPLED TANKS***

Fahd Farras Mahmod
NRP. 2212 100 102

Supervisor
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
Mochammad Sahal, ST., M.Sc.

***DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017***

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Perancangan Kontroler PI dengan Teknik MRAC untuk Pengaturan *Level* pada *Coupled Tanks***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 5 Januari 2017

Fahd Farras Mahmud
NRP 22 12 100 102

--halaman ini sengaja dikosongkan--

**PERANCANGAN KONTROLER PI DENGAN TEKNIK
MRAC UNTUK PENGATURAN LEVEL PADA COUPLED
TANKS**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

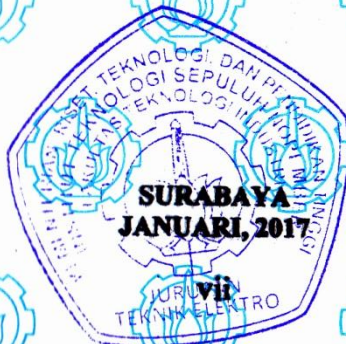
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Husein Effendia A.K., MT.
NIP. 195704241983021001

Mechammad Sahal, ST., M.Sc.
NIP. 197011191998021002



vii

Perancangan Kontroler PI dengan Teknik MRAC untuk Pengaturan Level pada *Coupled Tanks*

Fahd Farras Mahmod
2212 100 102

Pembimbing I : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT.
NIP : 195704241985021001
Pembimbing II : Mochammad Sahal, ST., M.Sc.
NIP : 197011191998021002

ABSTRAK

Di dalam tugas akhir ini, sistem pengaturan *level plant Coupled Tanks* dengan menggunakan *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) dirancang dengan menggunakan parameter kontroler PI. *Plant Coupled Tanks* terlebih dahulu dilakukan proses *decoupling* untuk memisahkan hubungan tangki 1 dan tangki 2. Pengujian *decoupling* dilakukan dengan menggunakan *random number* sebagai referensinya. Pengujian kontroler dilakukan dengan memberikan efek pembebanan yaitu nilai bukaan ketiga *valve* setiap 15 detik. Nilai *gain* adaptasi terbaik yang digunakan adalah γ_p dan γ_i masing-masing 1 dan 0,5. Hasil pengujian menunjukkan nilai *ess* dan *settling time* untuk tangki 1 adalah masing-masing $7,0166 \times 10^{-14}$ dan 19,6 detik. Nilai *ess* dan *settling time* untuk tangki 2 adalah masing-masing $7,8160 \times 10^{-14}$ dan 39 detik. Kedua kontroler yang digunakan mampu mengembalikan nilai keluaran sistem menuju referensi saat diberikan efek pembebanan, hal ini ditunjukkan oleh nilai RMSE pada kedua tangki yaitu 0,1% untuk tangki 1 dan 0,01% untuk tangki 2. Kontroler yang dirancang juga mampu untuk melakukan *tracking* dengan nilai referensi naik. Nilai RMSE pada kedua tangki adalah 1,8% dan 2,1%. Untuk *tracking* dengan nilai referensi naik dan turun, kontroler belum mampu melakukan adaptasi dengan cepat hal ini ditunjukkan oleh nilai RMSE di 133 detik pertama. RMSE untuk kedua tangki adalah 21% dan 23,4%. Namun setelah 133 detik, nilai RMSE menjadi 4,2% dan 6,2%.

Kata Kunci: *Coupled Tanks, PI, Model Reference Adaptive Control, Decoupling, Tracking*

--halaman ini sengaja dikosongkan--

PI CONTROLLER DESIGN USING MRAC TECHNIQUE FOR LEVEL CONTROL ON COUPLED TANKS

Fahd Farras Mahmod
2212 100 102

Supervisor I : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT.
ID : 195704241985021001
Supervisor II : Mochammad Sahal, ST., M.Sc.
ID : 197011191998021002

ABSTRACT

In this final project, a level control system for Coupled Tanks plant using Model Reference Adaptive Control (MRAC) is designed. This specific MRAC used PI adjustment mechanism. Decoupling process is used to separate one plant into two plants. To test the decoupling plant, random number is used as reference. The controller is tested with weighting effect. After the simulation, the values of γ_p and γ_i are 1 and 0,5 so the system output matches the set point. The transient characteristics shown that the value of ess and settling time on the first tank are 7.0166×10^{-14} and 19.6 seconds. The transient characteristics shown that the value of ess and settling time on the second tank are 7.8160×10^{-14} and 39 seconds. Both controllers successfully managed to keep the system output to match the given set point even when the weighting effect is given to the system. This is shown by the RMSE value on both tank. RMSE on the first tank is 0.1% and on the second tank is 0.01%. The designed controller is also capable for tracking purpose with up reference. This is proven by the RMSE on the first tank which is 1.8% and on the second tank which is 2.1%. For the tracking purpose with fluctuative reference, the controller is not capable for adapting quickly. This is shown by the values of RMSE in the first 113 seconds which are 21% on the first tank and 23.4% on the second tank. After that, the values of RMSE decreases to 4.2% on the first tank and 6.2% on the second tank.

Keywords: Coupled Tanks, PI, Model Reference Adaptive Control, Decoupling, Tracking

--halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku tugas akhir dengan judul **“PERANCANGAN KONTROLER PI DENGAN TEKNIK MRAC UNTUK PENGATURAN LEVEL PADA *COUPLED TANKS*”**. Tugas akhir merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan program studi Strata-1 pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerja sama dari berbagai pihak sehingga kendala-kendala tersebut dapat diatasi. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta memperlancar dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
3. Kedua Dosen Pembimbing, Bapak Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT. dan Bapak Mochammad Sahal St., M.Sc. atas segala bimbingannya kepada penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Semua dosen Jurusan Teknik Elektro ITS atas segala ilmu dan masukan kepada penulis.
5. Rekan-rekan e52 khususnya bidang studi Sistem Pengaturan.
6. Teman-teman asisten B405.

Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

--halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi	3
 BAB 2 TEORI PENUNJANG.....	 5
2.1 Sistem Pengaturan	5
2.2 Karakteristik Sistem Orde Pertama	6
2.3 <i>Coupled Tanks</i>	11
2.4 <i>Decoupling</i>	14
2.5 Kontroler Proporsional Integral	14
2.6 Sistem Pengaturan Adaptif	15
2.7 MRAC dengan <i>MIT Rule</i>	18
 BAB 3 PERANCANGAN SISTEM.....	 23
3.1 Gambaran Umum Sistem.....	23
3.2 Pemodelan <i>Coupled Tanks</i>	23
3.3 <i>Decoupling Plant</i>	24
3.4 Perancangan MRAC PI	27
 BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS	 33
4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem.....	33
4.2 Pengujian <i>Open Loop</i>	33
4.3 Pengujian <i>Decoupling</i>	34

4.4	Pengujian MRAC PI	39
BAB 5 PENUTUP		49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	49
DAFTAR PUSTAKA		51
LAMPIRAN A		A1
A.1	<i>Simulink Plant</i>	A1
A.2	<i>Simulink Decoupler</i>	A1
A.3	<i>Simulink MRAC Tangki 1</i>	A2
A.4	<i>Simulink MRAC Tangki 2</i>	A2
A.5	<i>Simulink Perubahan Beban</i>	A3
A.6	<i>Simulink Sistem Pengaturan Level</i>	A4
LAMPIRAN B		B1
B.1	<i>Script Parameter Plant</i>	B1
B.2	<i>Script MRAC</i>	B1
RIWAYAT PENULIS		C1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Pengaturan	6
Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Orde Pertama	6
Gambar 2.3 Respon <i>Step</i> Sistem Orde Pertama untuk $K=1$	7
Gambar 2.4 Respon <i>Step</i> Sistem Orde Pertama untuk $K \neq 1$	8
Gambar 2.5 Karakteristik Sistem Orde Pertama	9
Gambar 2.6 <i>Coupled Tanks System</i>	11
Gambar 2.7 Diagram Blok <i>Plant</i> dengan <i>Decoupling</i>	14
Gambar 2.8 Diagram Blok Model MRAC	16
Gambar 2.9 Diagram Blok <i>Gain Scheduling</i>	17
Gambar 2.10 Diagram Blok <i>Self-Tuning Regulators</i>	18
Gambar 2.11 Diagram Blok Algoritma Penempatan Pole	19
Gambar 2.12 Diagram Blok MRAC Orde Satu dengan <i>MIT Rule</i> ..	21
Gambar 3.1 Diagram <i>Simulink Plant</i> Nonlinier <i>Coupled Tanks</i>	24
Gambar 3.2 Diagram <i>Simulink Decoupler Plant</i>	26
Gambar 3.3 Diagram <i>Simulink Decoupling</i> dengan <i>Plant</i>	27
Gambar 4.1 Respon <i>Open Loop</i> Tangki 1	33
Gambar 4.2 Respon <i>Open Loop</i> Tangki 2	34
Gambar 4.3 Respon Level dengan <i>Decoupling</i>	35
Gambar 4.4 Respon <i>Level Decoupling</i> dengan <i>Input Random Number</i> di u_2	36
Gambar 4.5 Respon <i>Level Decoupling</i> dengan <i>Input Random Number</i> di u_2	36
Gambar 4.6 Parameter <i>Bukaan Valve Out</i> Tangki 1	37
Gambar 4.7 Parameter <i>Bukaan Valve Out</i> Tangki 2	37
Gambar 4.8 Parameter <i>Bukaan Valve Out</i> Tangki 3	38
Gambar 4.9 Respon <i>Decoupling</i> dengan <i>Beban</i>	38
Gambar 4.10 Respon <i>Level</i> Tangki 1 dengan MRAC PI	39
Gambar 4.11 Respon <i>Level</i> Tangki 2 dengan MRAC PI	40
Gambar 4.12 Respon <i>Level</i> Tangki 1 MRAC PI dengan <i>Beban</i>	41
Gambar 4.13 Respon <i>Level</i> Tangki 2 MRAC PI dengan <i>Beban</i>	41
Gambar 4.14 <i>Signal Builder</i> untuk <i>Tracking Level</i>	42
Gambar 4.15 Respon <i>Tracking Level</i> Tangki 1 Referensi Naik.....	43
Gambar 4.16 Respon <i>Tracking Level</i> Tangki 2 Referensi Naik.....	43
Gambar 4.17 Respon <i>Tracking Level</i> Tangki 1 MRAC PI dengan <i>Beban</i> ..	44
Gambar 4.18 Respon <i>Tracking Level</i> Tangki 2 MRAC PI dengan <i>Beban</i> ..	45

Gambar 4.19 Respon Tracking Level Tangki 1 dengan Referensi Naik dan Turun..... 45

Gambar 4.20 Respon *Tracking Level* Tangki 2 dengan Referensi Naik dan Turun..... 46

Gambar 4.21 Respon *Tracking Level* Tangki 1 dengan Referensi Naik Turun dan Beban..... 46

Gambar 4.22 Respon *Tracking Level* Tangki 2 dengan Referensi Naik Turun dan Beban..... 47

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai Parameter <i>Plant Coupled Tanks</i>	24
Tabel 4.1 Karakteristik <i>Transient Level</i> dengan <i>Decoupling</i>	35
Tabel 4.2 Karakteristik <i>Transient Level</i> Tangki 1	39
Tabel 4.3 Karakteristik <i>Transient Level</i> Tangki 2	40

--halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada Bab ini berisikan penjelasan awal mengenai penelitian yang akan dilakukan. Penjelasan tersebut meliputi latar belakang masalah, permasalahan yang diangkat, batasan masalah yang digunakan, tujuan dari penelitian ini, sistematika penulisan, penyusunan laporan dan juga relevansi.

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem kendali otomatis (*automatic control system*) sudah merambah ke setiap sisi kehidupan manusia. Penelitian tentang teknologi kendali juga dilakukan untuk mengendalikan proses pada dunia industri, seperti pengendalian proses pada industri kimia (*chemical plant*), industri otomotif, dan sebagainya. Proses kendali di industri kimia merupakan proses yang berlangsung secara dinamik, yaitu variabel-variabel yang menentukan terjadinya proses itu berubah-ubah terhadap waktu. Ada banyak pengendalian yang harus dikendalikan dalam suatu proses di industri, diantaranya *pressure, flow, temperature, concentration* dan *level*. Pengendalian *level* merupakan permasalahan umum yang terjadi di industri proses. Dalam beberapa kasus, pengaturan yang dilakukan bisa melibatkan *single loop* atau *multi loop*. Salah satunya adalah tangki berinteraksi (*Coupled Tanks*).

Coupled Tanks digolongkan ke dalam *plant* dengan sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO) atau proses *multivariable*. Pengaturan pada *plant* MIMO lebih sulit dibanding *plant* dengan sistem *Single Input Single Output* (SISO). Karena adanya interaksi silang antara variabel masukan dan keluaran, sehingga metode kontrol yang diterapkan pada sistem SISO bisa tidak dapat digunakan secara baik pada sistem MIMO. Pada pengaturan *level* fluida di *Coupled Tanks*, *level* pada tangki kedua akan dipengaruhi oleh aliran fluida dari tangki pertama. Pemindahan cairan dari satu tangki ke tangki yang lain menyebabkan berubahnya *level* cairan dalam tangki.

Permasalahan pengaturan *level* pada *coupled tanks* telah banyak dilakukan. Salah satu yang umum digunakan adalah kontroler PI (Proportional Integral). Beberapa pengembangan dari kontroler ini juga sudah dibahas salah satunya yaitu dengan menggunakan MRAC (*Model Reference Adaptive Control*) [1]. Penelitian yang dilakukan oleh M Saad

menggunakan model matematika *plant* yang telah dilinierisasi dan metode *Lyapunov Theory* [2] dalam merancang MRAC. Ada beberapa hal yang belum tercakup yaitu tentang efek pembebanan pada *plant* dan *tracking*. Pada penelitian ini penulis menggunakan *plant* yang tetap nonlinier, *decoupling* nonlinier untuk memisahkan, dan metode *MIT Rule* untuk merancang MRAC PI [2]. Selain itu penelitian ini juga membahas mengenai efek pembebanan pada *plant* dan *tracking*.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian mengenai pengaturan *level* pada *coupled tanks* [1] oleh M Saad belum mencakup permasalahan pembebanan pada *plant* dan *tracking*. Selain respon yang cepat, sebuah kontroler yang baik harus bisa menjaga nilai keluaran sistem agar tetap pada nilai yang diinginkan di setiap waktu termasuk saat terjadi pembebanan. Permasalahan yang diangkat di Tugas Akhir ini pertama adalah mengenai *decoupling nonlinier* yang digunakan untuk memisahkan hubungan *input-output* antara tangki 1 dan tangki 2. Kedua adalah mengenai perancangan kontroler MRAC PI dengan menggunakan *MIT Rule*. Ketiga adalah mengenai efek pembebanan dan *tracking* yang merupakan titik berat dari Tugas Akhir ini.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan pada tugas akhir ini dibatasi oleh beberapa hal antara lain:

- a. *Plant* yang digunakan adalah *Coupled Tanks* pada penelitian yang dilakukan oleh M Saad [1].
- b. Model matematika *plant* yang digunakan adalah nonlinier.
- c. Pengaturan *level* untuk tangki 1 dan tangki 2 pada *Coupled Tanks*.
- d. Kontroler yang digunakan adalah MRAC dengan mekanisme adaptasi kontrol PI.
- e. Perancangan kontroler MRAC menggunakan metode *MIT Rule*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah merancang sistem pengaturan *level* pada *Plant Coupled Tanks* dengan menggunakan teknik MRAC dan algoritma kontroler PI sebagai mekanisme adaptasinya. Sehingga bisa didapatkan sistem pengaturan yang dapat menjaga nilai keluaran sistem (*level*) sesuai dengan nilai referensi di setiap waktu

terutama saat pembebanan dan juga bisa digunakan untuk keperluan *tracking level*.

1.5 Sistematika Penulisan

Buku Tugas Akhir ini terdiri dari lima bab dan disusun menurut sistematika penulisan berikut ini:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori yang menunjang penelitian, berupa teori tentang *Coupled Tanks* yang meliputi persamaan matematika dan penurunannya, serta metode yang digunakan untuk pengaturan *level*.

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi tentang penurunan model matematika untuk mendapatkan dinamika *plant* dan perancangan kontroler PI dengan teknik MRAC.

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini berisi tentang hasil pengujian kontroler dengan menggunakan beberapa parameter dan juga analisisnya.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran yang dapat dijadikan pertimbangan pengembangan berdasar hasil pengerjaan Tugas Akhir ini.

1.6 Relevansi

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam pengembangan penelitian tentang *Coupled Tanks* khususnya dengan menggunakan MRAC.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Kegiatan penelitian dan perancangan merupakan hasil mengkaji teori-teori yang sudah ada sebelumnya. Seluruh teori yang digunakan kemudian disajikan untuk memperkuat argumen penulis dalam penelitian ini.

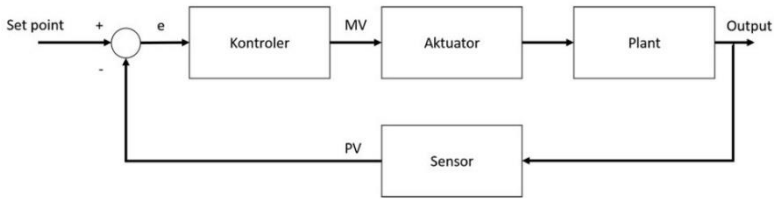
Pada Bab ini, berisi tentang teori penunjang dari berbagai pustaka atau literatur seperti buku dan *paper* yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang pada Bab ini meliputi *Plant Coupled Tanks*, *decoupling*, kontroler PI, MRAC, dan *MIT Rule*.

2.1 Sistem Pengaturan [3]

Sistem merupakan sekumpulan perangkat yang saling bekerja sama untuk mencapai tujuan tertentu. Pengaturan atau kontrol adalah upaya yang dilakukan untuk menjaga atau mencapai kondisi yang diinginkan pada sistem fisik dengan mengubah variabel tertentu yang dipilih. Pengaturan dapat juga berarti mengukur nilai dari variabel sistem yang dikontrol dan menerapkan variabel yang dimanipulasi ke sistem untuk mengoreksi atau membatasi penyimpangan nilai yang diukur dari nilai yang dikehendaki. Sistem pengaturan merupakan sistem yang komponen-komponennya telah dikonfigurasi untuk menghasilkan karakteristik sistem yang diinginkan. Secara umum bentuk

Dalam melakukan pengaturan diperlukan satu komponen penting yaitu kontroler. Kontroler adalah komponen dalam sistem pengaturan yang menghasilkan sinyal kontrol. Dalam sistem pengaturan khususnya sistem pengaturan loop tertutup, kontroler akan membandingkan *setpoint* dengan variabel keluaran (keluaran terukur), menghitung berapa banyak koreksi yang perlu dilakukan, dan mengeluarkan sinyal koreksi (sinyal kontrol) sesuai dengan perhitungan tadi.

Elemen utama pada sistem pengaturan sesuai dengan diagram blok pada Gambar 2.1 adalah *plant*, kontroler, aktuator, dan sensor. *Plant* merupakan elemen yang dikendalikan nilai keluarannya. Kontroler adalah yang bertugas mengendalikan keluaran dari *plant* dan memperbaiki performa dari suatu sistem pengaturan. Aktuator atau biasa disebut *final control element* adalah perangkat yang berhubungan langsung dengan *plant*. Sensor berfungsi untuk membaca nilai keluaran dari *plant*.



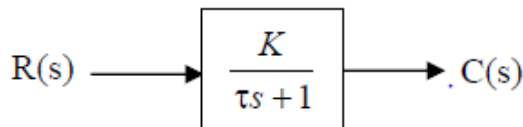
Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Pengaturan

Plant adalah nama lain untuk sistem. *Plant* adalah seperangkat peralatan mungkin hanya terdiri dari beberapa bagian mesin yang bekerja bersama-sama, yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu. Pada sistem pengaturan, setiap obyek fisik yang dikontrol disebut *plant*. Nilai keluaran atau output yang dihasilkan sistem akan diukur oleh sensor sebagai acuan perbaikan nilai kesalahan oleh kontroler.

Pada sistem pengaturan ada tiga parameter nilai yaitu *set point* atau *set value* (SV), *manipulated value* (MV), dan *process value* (PV). *Set point* merupakan nilai dari keluaran proses atau *plant* yang kita kehendaki. *Manipulated value* (MV) atau biasa disebut dengan sinyal kontrol merupakan keluaran dari kontroler, sedangkan *process value* (PV) merupakan hasil pembacaan dari sensor terhadap nilai keluaran dari *plant*.

2.2 Karakteristik Sistem Orde Pertama [3]

Model matematika dari sistem orde pertama dapat dinyatakan dalam bentuk diagram blok seperti berikut ini.



Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Orde Pertama

Dimana $R(s)$ dan $C(s)$ masing-masing adalah sinyal masukan dan sinyal keluaran sistem orde pertama dalam domain s . Fungsi alih *loop* tertutup (*Closed Loop Transfer Function*) sistem orde pertama dapat dituliskan pada Persamaan (2.1) dimana K adalah *gain overall* dan τ adalah konstanta waktu.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

Selanjutnya dibahas mengenai analisis respon sistem orde pertama untuk sinyal *step*. Dalam bahasan ini, diasumsikan bahwa syarat awalnya adalah nol. Untuk masukan *unit step*, $r(t) = 1u(t) \rightarrow R(s) = 1/s$, maka keluaran sistem orde pertama dalam domain s adalah:

$$C(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (2.2)$$

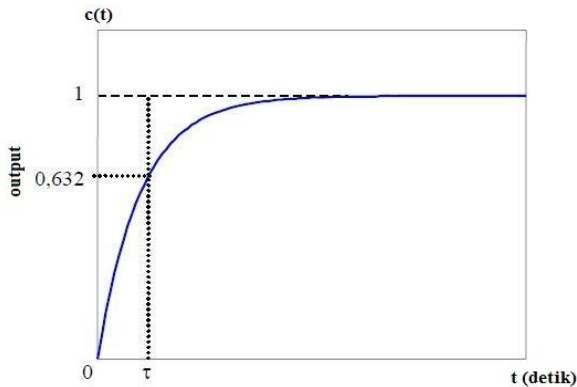
$$A = \frac{K/\tau}{s + 1/\tau} \Big|_{(s=0)} = K$$

$$B = \frac{K/\tau}{s} \Big|_{(s=-1/\tau)} = -K$$

$$C(s) = K \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \right) \quad (2.3)$$

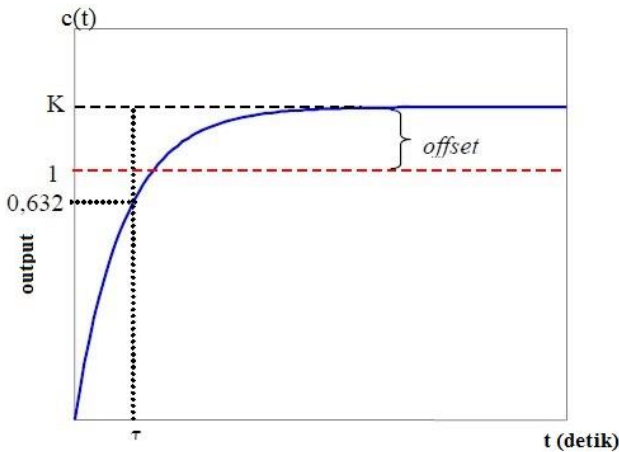
Dengan menggunakan transformasi laplace invers pada Persamaan (2.3) diperoleh Persamaan (2.4).

$$c(t) = K \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t} \right) \quad t \geq 0 \quad (2.4)$$



Gambar 2.3 Respon *Step* Sistem Orde Pertama untuk $K=1$

Gambar 2.3 merupakan kurva dari Persamaan (2.4). Kurva keluaran $c(t)$ mula-mula nol kemudian akhirnya menjadi sama dengan 1. Salah satu karakteristik penting dari kurva respon eksponensial $c(t)$ tersebut adalah bahwa pada $t = \tau$ harga $c(t)$ adalah 0,632 atau respon $c(t)$ telah mencapai 63,2% perubahan totalnya. Tampak pada kurva tidak terdapat *offset*, sehingga untuk $K = 1$ sistem ini merupakan sistem orde pertama *zero offset*. Untuk nilai $K \neq 1$, Persamaan (2.4) digambarkan oleh Gambar 2.4.



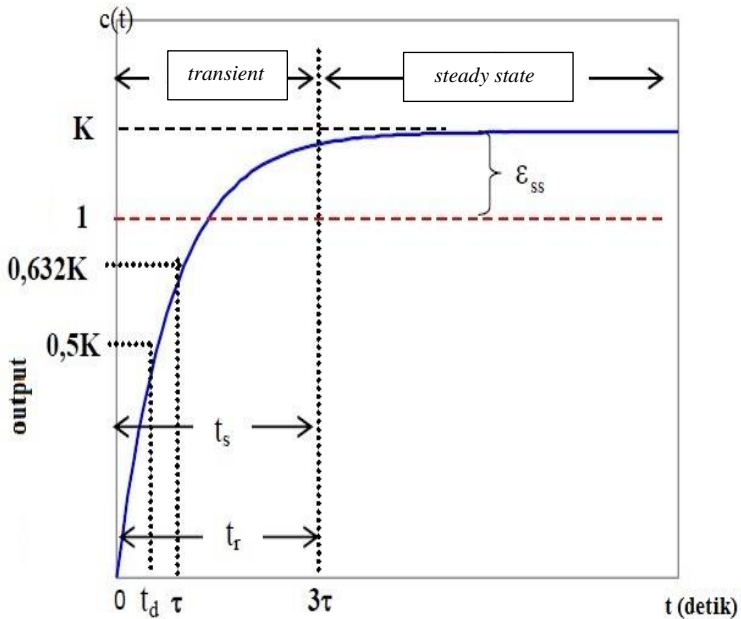
Gambar 2.4 Respon *Step* Sistem Orde Pertama untuk $K \neq 1$

Kurva keluaran $c(t)$ mula-mula bernilai nol kemudian akhirnya menjadi sama dengan K . Pada nilai $t = \tau$ harga $c(t)$ adalah $0,632K$. Tampak pada kurva terdapat *offset*, sehingga untuk $K \neq 1$ sistem ini merupakan sistem orde pertama *nonzero offset*. *Offset* adalah *error* sistem pada keadaan tunak (*steady state*) atau biasa disebut dengan *error steady state* (e_{ss}). Besarnya *offset* atau *error steady state* dari sistem orde pertama terhadap masukan sinyal step dapat dituliskan sebagai Persamaan (2.5).

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 1 - K \quad (2.5)$$

Karakteristik respon waktu untuk sistem orde pertama diberikan berdasarkan respon sistem terhadap masukan sinyal *step*. Karakteristik

respon waktu sistem orde pertama dibedakan menjadi karakteristik respon *transient* dan karakteristik respon keadaan tunak atau *steady state* yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Karakteristik Sistem Orde Pertama

Karakteristik respon transien sistem orde pertama terdiri dari spesifikasi teoritis dan spesifikasi praktis. Spesifikasi teoritis konstanta waktu (τ) adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t=0$ sampai dengan respon mencapai 63,2% dari respon *steady state*. Konstanta waktu menyatakan kecepatan respon sistem. Konstanta waktu yang kecil akan mempercepat respon sistem.

Spesifikasi praktis sistem orde pertama terdiri dari waktu tunak atau *setting time*, waktu naik atau *rise time*, dan waktu tunda atau *delay time*.

1. Waktu tunak atau *settling time* (t_s) adalah ukuran waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah masuk pada daerah stabil (dapat dianggap stabil). Jika dihubungkan dengan

konstanta waktu, maka nilai t_s dapat diformulasikan menjadi Persamaan (2.6) untuk 5%, Persamaan (2.7) untuk 2%, dan Persamaan (2.8) untuk 0,5%.

$$t_s(\pm 5\%) \approx 3\tau \quad (2.6)$$

$$t_s(\pm 2\%) \approx 4\tau \quad (2.7)$$

$$t_s(\pm 0,5\%) \approx 5\tau \quad (2.8)$$

2. Waktu naik atau *rise time* (t_r) adalah waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah naik dari 5% ke 95% yang dinyatakan oleh Persamaan (2.9) atau 10% ke 90% yang dinyatakan oleh Persamaan (2.10) dari nilai respon pada keadaan tunak (*steady state*).

$$t_r(5\% - 95\%) = \tau \ln 19 \quad (2.9)$$

$$t_r(10\% - 90\%) = \tau \ln 9 \quad (2.10)$$

3. Waktu tunda adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t=0$ sampai respon mencapai 50% dari nilainya pada keadaan tunak (*steady state*). Waktu tunda menyatakan besarnya faktor keterlambatan respon akibat proses *sampling*. Jika dihubungkan dengan konstanta waktu maka nilai waktu tunda dapat diformulasikan menjadi Persamaan (2.11).

$$t_d = \tau \ln 2 \quad (2.11)$$

Karakteristik respon keadaan tunak (*steady state*) sistem orde pertama diukur berdasarkan kesalahan pada keadaan tunak atau *error steady state* (e_{ss}). Besarnya kesalahan pada keadaan tunak dapat dituliskan dengan Persamaan (2.12).

$$e_{ss} = C_{ss} - R_{ss} \quad (2.12)$$

Dimana C_{ss} dan R_{ss} masing-masing adalah keluaran dan masukan sistem pada keadaan tunak yang besarnya dapat dituliskan dengan Persamaan (2.13) dan Persamaan (2.14). Dengan nilai *error steady state* pada Persamaan (2.15).

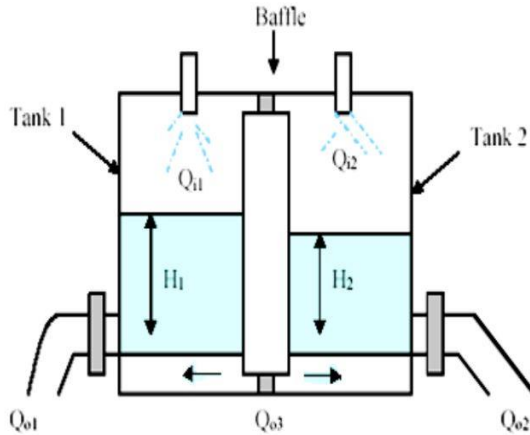
$$C_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = K \quad (2.13)$$

$$R_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sR(s) = 1 \quad (2.14)$$

$$e_{ss} = 1 - K \quad (2.15)$$

2.3 Coupled Tanks [1]

Coupled Tanks merupakan sistem atau *plant* yang tersusun atas dua segmen *tank*. *Coupled Tanks* bisa digunakan untuk mengatur *flow* dari fluida diantara kedua *tank*. Setiap tangki dipasang lubang sebagai masukan fluida dan keluaran fluida. Untuk mengukur *level* fluida setiap *tank* dilengkapi dengan sensor *level* salah satunya adalah sensor kapasitif. Kedua tangki dihubungkan oleh sebuah pipa atau lubang saluran. *Level* fluida pada tangki pertama disimbolkan dengan H_1 dan *level* fluida di tangki kedua disimbolkan dengan H_2 . Bentuk *Coupled Tanks* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Coupled Tanks System* [1]

Adanya hubungan antara tangki ini membuat level cairan pada setiap tangki saling berinteraksi atau berhubungan. Konfigurasi tangki seperti ini banyak digunakan pada industri proses seperti industri *petrochemical*, pembuatan kertas, dan industri pengolahan air. Sistem *Coupled Tanks* dapat dikonfigurasi sebagai sistem *Single Input Single Output*

(SISO), *Multi Input Multi Output* (MIMO), atau *Single Input Multi Output* (SIMO) berdasarkan manipulasi masukan pada pompa dan daerah kerja dari *rotary valve* yang terdapat pada *plant Coupled Tanks*.

Bila masukan kontrol adalah aliran fluida yang masuk ke tangki (Q_{i1} & Q_{i2}), maka variabel yang akan dikontrol adalah kedua *level* yaitu H_1 dan H_2 . Hal ini mengakibatkan adanya interaksi antara kedua tangki. Sistem *Coupled Tanks* dapat dikonfigurasi sebagai sistem SISO atau sebagai Sistem TITO melalui manipulasi pompa *input* dan *sectional* daerah *valve*. Dengan menggunakan hukum keseimbangan massa, persamaan dinamis dari masing-masing tangki dapat dirumuskan dalam bentuk nonlinier di bawah ini.

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - Q_{o1} - Q_{o3} \quad (2.16)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - Q_{o2} - Q_{o3} \quad (2.17)$$

Dimana, H_1 , H_2 masing-masing adalah tinggi dari cairan pada tangki 1 dan 2, A_1 dan A_2 adalah luas penampang tangki 1 dan tangki 2. Q_{o3} adalah debit air yang keluar dari tangki 1 menuju tangki 2. Q_{i1} dan Q_{i2} adalah debit air dari pompa masing-masing menuju tangki 1 dan tangki 2. Q_{o1} dan Q_{o2} adalah debit air keluar masing-masing dari tangki 1 dan tangki 2. Dari Persamaan Hukum Bernoulli untuk cairan non-kental, mampat cairan dalam aliran didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$Q_{o1} = s_1 \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} = \alpha_1 \sqrt{H_1} \quad (2.18)$$

$$Q_{o2} = s_2 \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2} = \alpha_2 \sqrt{H_2} \quad (2.19)$$

$$Q_{o3} = s_3 \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1 - H_2} = \alpha_3 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (2.20)$$

Simbol a_1 , a_2 , dan a_3 merupakan konstanta proporsional dimana bergantung dari koefisien debit area yang saling silang dan konstan gravitasi. Dengan menggunakan nilai dari Persamaan (2.18), Persamaan (2.19), dan Persamaan (2.20) ke Persamaan (2.16) dan Persamaan (2.17) maka dapat diperoleh Persamaan (2.21) dan Persamaan (2.22) yaitu persamaan nonlinier yang menggambarkan dinamika *multi input multi output* (MIMO) dari sistem *Coupled Tanks*.

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - \alpha_1 \sqrt{H_1} - \alpha_3 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (2.21)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - \alpha_2 \sqrt{H_2} - \alpha_3 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (2.22)$$

Simbol-simbol di atas dapat dinyatakan sebagai berikut. H_1 dan H_2 adalah *level* air pada tangki 1 dan tangki 2. Q_{o3} adalah *flow* fluida diantara kedua tangki. Q_{i1} dan Q_{i2} adalah *flow* masuk dari pompa menuju tangki 1 dan tangki 2. Q_{o1} dan Q_{o2} adalah *flow* keluar dari tangki 1 dan tangki 2. Nilai α_1 , α_2 , dan α_3 adalah rasio bukaan *valve* pada keluaran tangki 1, tangki 2, dan rasio bukaan *valve* antara tangki 1 dan tangki 2. A_1 dan A_2 adalah luas penampang tangki 1 dan tangki 2.

Mengingat adanya perubahan yang kecil dari q_1 dan q_2 di kedua *input control* masing-masing, h_1 dan h_2 akan menjadi hasil perubahan dari *level* dua tangki. Model linierisasi didapat menjadi Persamaan (2.23) dan Persamaan (2.24).

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = q_1 - \frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} h_1 - \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}} (h_1 - h_2) \quad (2.23)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = q_2 - \frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_2}} h_2 + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}} (h_1 - h_2) \quad (2.24)$$

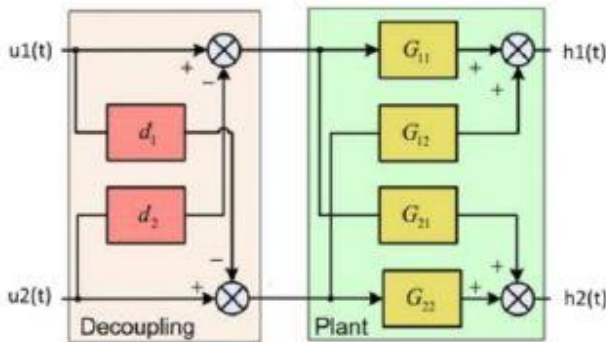
Dinamika dari *Coupled Tanks* dapat dimodelkan dengan Persamaan (2.25) dan Persamaan (2.26)

$$\begin{aligned} \frac{dH_1(t)}{dt} = & \frac{k_1}{A} U_1(t) - \frac{\beta_1 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} H_1(t) \\ & + \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_2(t)}{dt} = & \frac{k_2}{A} U_2(t) - \frac{\beta_2 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} H_2(t) \\ & - \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.4 Decoupling [4]

Plant Coupled-Tank memiliki dua *input* dan *output* yang punya pengaruh silang. Pada Gambar 2.7, *output* $h_1(t)$ tidak hanya dipengaruhi oleh $u_1(t)$ tetapi juga dipengaruhi oleh $u_2(t)$, begitu juga dengan $h_2(t)$. *Plant* pada proses semacam ini dapat disederhanakan seakan-akan seperti proses SISO dengan teknik *Decoupling*. *Decoupling* mentransformasikan model MIMO ke dalam SISO untuk memudahkan analisis dan perancangan kontroler.



Gambar 2.7 Diagram Blok *Plant* dengan *Decoupling* [5]

Untuk mengurangi interaksi *control loop*, dapat ditambahkan dekopler pada konfigurasi *multiloop* konvensional. Dekopler dirancang untuk mengkompensasi interaksi proses yang tidak diinginkan. Sistem kontrol dekopling memberi dua keuntungan:

- Interaksi *control loop input* lain dihilangkan sehingga stabilitas sistem *closed loop* sistem ditentukan oleh karakteristik *feedback closed loop input* itu sendiri
- Perubahan *setpoint* pada satu pengubah terkendali tidak mempengaruhi pengubah-pengubah terkendali yang lain.

2.5 Kontroler Proporsional Integral [3]

Kontroler proporsional (P) memiliki sinyal keluaran sebanding dengan sinyal kesalahan sistem. Artinya sinyal kontrol akan langsung mengubah sinyal kesalahan dikalikan dengan suatu konstanta proporsionalnya. Kontroler proporsional memiliki nilai konstanta

proporsional (K_p) mempengaruhi cepatnya respon kontroler untuk mencapai nilai *setpoint*. Semakin besar nilai K_p maka respon akan semakin cepat, namun jika nilai K_p besar akan menyebabkan respon *overshoot* dan osilasi. Persamaan (2.27) merupakan persamaan kontroler proporsional.

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.27)$$

Kontroler integral (I) memiliki sinyal keluaran integral dari eror sistem. Dengan kata lain sinyal keluaran kontroler integral adalah luas bidang yang dibentuk oleh sinyal *error*. Persamaan (2.28) merupakan persamaan kontroler integral.

$$u(t) = k_i \int e(t)dt = k_p \frac{1}{\tau_i} \int e(t)dt \quad (2.28)$$

Kontroler integral dapat mengeliminasi *error steady state*. Selain itu kontroler integral responnya membutuhkan selang waktu tertentu sehingga terkesan memperlambat respon. Kontroler PI merupakan gabungan dan memiliki sifat dari kontroler proporsional dan integral. Persamaan (2.29) merupakan persamaan kontroler PI.

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t)dt \right] \quad (2.29)$$

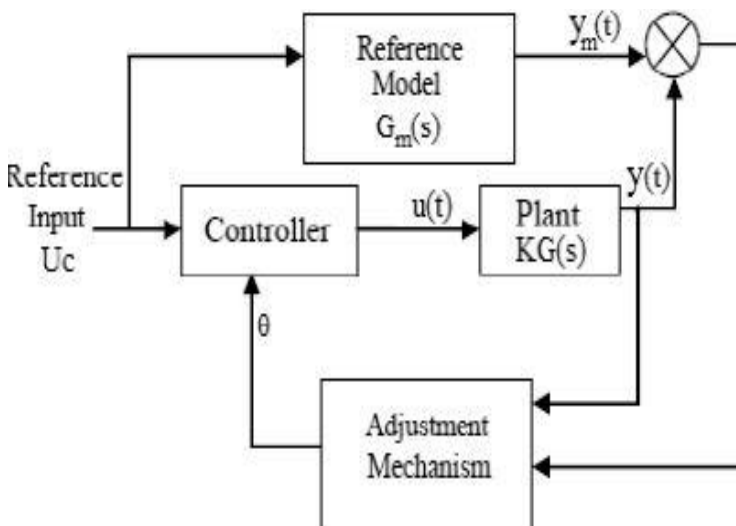
Performa kontroler PI sangat ditentukan oleh nilai parameter P dan I. Untuk memenuhi spesifikasi sistem pengaturan yang diinginkan, parameter PI harus diperhitungkan terlebih dahulu dengan berbagai metode yang sesuai dengan sistem atau *plant*.

2.6 Sistem Pengaturan Adaptif [2]

Sistem kendali adaptif merupakan sistem kendali yang mempunyai parameter-parameter kendali yang dapat beradaptasi. Parameter-parameter kendali tersebut beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan disekitarnya, seperti adanya gangguan, serta perubahan karakter internal dari sistem yang dikendalikan. Penggunaan sistem kendali adaptif menunjukkan peningkatan kinerja sistem karena suatu sistem umumnya berada dalam situasi yang mengandung derau dan gangguan serta kondisi internal dan eksternalnya mengandung ketidakpastian. Sistem kendali adaptif telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang industri pengolahan bahan kimia, sistem penerbangan, serta sistem otomotif. Dalam bidang pengolahan hasil bumi, pengolahan

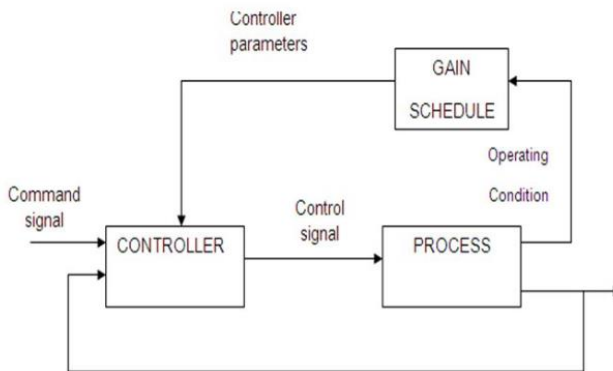
bahan dasar minyak CPO (*crude-palm oil*). Terdapat beberapa tipe sistem pengaturan adaptif yaitu *model reference adaptive control*, *gain scheduling*, dan *self tuning regulators*.

Model Reference Adaptive Control (MRAC) adalah kontroler adaptif yang penting. Dalam MRAC performa sistem yang diinginkan dinyatakan dalam suatu model referensi. Diagram blok dari sistem ditunjukkan pada Gambar 2.8. Sistem memiliki *loop* umpan balik yang terdiri dari proses dan kontroler serta *loop* umpan balik yang lain yang mengubah parameter kontroler. Parameter diubah berdasarkan umpan balik dari *error*, yang merupakan selisih antara *output* dari sistem dan *output* dari model referensi. *Loop* umpan balik pertama disebut *inner loop* dan *loop* kedua disebut *outer loop*. Mekanisme penyesuaian parameter dalam MRAC dapat diperoleh dengan dua cara yaitu dengan menggunakan metode gradien atau dengan menerapkan teori stabilitas. Dalam MRAC perilaku yang diinginkan dari sistem ditentukan oleh sebuah model dan parameter kontroler disesuaikan berdasarkan *error* yang merupakan selisih antara *output* dari sistem *loop* tertutup dan model tersebut.



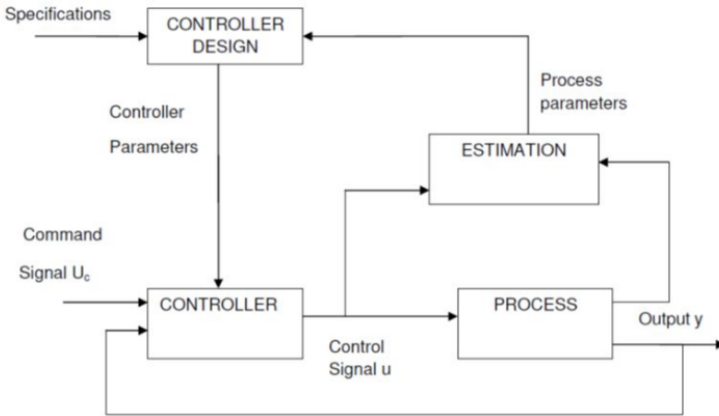
Gambar 2.8 Diagram Blok Model MRAC [2]

Gain scheduling adalah sebuah metode kontrol dimana besar parameter kontrol yang digunakan adalah berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Agar setiap saat kontroler mengetahui kondisi proses, maka dalam skema kontrol ini diperlukan pengukuran variabel tambahan yang secara teknik digunakan sebagai variabel penjadwal (*scheduled variable*).



Gambar 2.9 Diagram Blok *Gain Scheduling* [2]

Kontroler adaptif secara umum mempunyai dua *loop*, *inner loop* terdiri dari proses dan umpan balik kontroler dan *outer loop* yang merupakan proses untuk mendapatkan parameter kontroler. Pada *estimator* terjadi proses estimasi terhadap perubahan parameter proses yang dilakukan secara terus-menerus. Sinyal kontroler yang dihasilkan akan dapat mengikuti adanya perubahan parameter proses. *Estimator* pada blok merepresentasikan proses estimasi parameter secara langsung. Blok kontroler desain merepresentasikan penyelesaian langsung untuk desain dari parameter yang telah diidentifikasi sebelumnya untuk menghasilkan parameter kontroler terbaru sesuai kondisi objek pada saat itu. Dan terakhir pada blok kontroler adalah untuk menghitung aksi kontrol yang akan diberikan kepada objek dengan parameter kontroler yang telah dihitung pada blok sebelumnya. Sehingga sistem dapat dikatakan sebagai otomatisasi proses modeling (*estimation*) dan desain. Yang mana model dari proses dan desain kontrol diperbaharui setiap saat.



Gambar 2.10 Diagram Blok *Self-Tuning Regulators* [2]

2.7 MRAC dengan *MIT Rule* [2]

Berikut ini akan dijabarkan *MIT Rule* pada sistem *loop* tertutup yang mana kontrolernya memiliki sebuah parameter yang dapat diatur berupa θ . Respon sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya dinotasikan y_m , keluaran proses dinotasikan sebagai y . *Error* merupakan selisih antara keluaran y dari sistem *loop* tertutup dan keluaran dari model y_m . *Error* dinotasikan sebagai e . Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian yaitu $J(\theta)$ yang dapat dituliskan sebagai Persamaan (2.30).

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.30)$$

Agar nilai J kecil dilakukan perubahan parameter pada gradien negative dari J , sehingga didapatkan Persamaan (2.31).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.31)$$

Persamaan (2.31) ini dinamakan sebagai aturan *MIT Rule*. Turunan parsial $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ disebut sebagai turunan kepekaan (*sensitivity derivative*) sistem

yang menunjukkan bagaimana *error* dipengaruhi oleh parameter yang dapat diatur (*adjustable parameter*). Jika diasumsikan parameter berubah lebih lambat dari variabel lain dari sistem, $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ dapat diasumsikan sebagai nilai konstan.

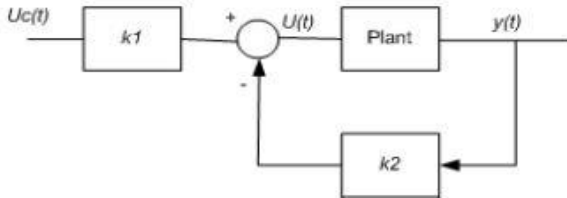
Berikut akan disajikan desain sistem kontrol adaptif sistem orde satu dengan menggunakan *MIT Rule*. Sistem proses ditunjukkan oleh Persamaan (2.32).

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu \quad (2.32)$$

Dimana u adalah variabel kontrol dan y adalah keluaran yang terukur. Diinginkan keluaran respon sistem sesuai dengan keluaran model sistem *loop* tertutup sesuai dengan Persamaan (2.33).

$$\frac{dy}{dt} = -a_my_m + b_mu_c \quad (2.33)$$

Pada percangan ini digunakan kontroler dengan algoritma penempatan *pole* (*pole placement*) [5]. Pada algoritma ini terdapat dua parameter yang digunakan untuk mengatur besarnya sinyal kontrol keluaran dari kontroler yaitu k_1 dan k_2 . Algoritma penempatan *pole* ini dapat dituliskan dalam diagram blok pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Diagram Blok Algoritma Penempatan *Pole*

Persamaan sinyal kontroler selanjutnya dapat ditulis sebagai Persamaan (2.34).

$$u(t) = k_1 u_c(t) - k_2 y(t) \quad (2.34)$$

$$k_1 = \frac{b_m}{b} \quad (2.35)$$

$$k_2 = \frac{a_m - a}{b} \quad (2.36)$$

Jika kedua parameter tersebut memenuhi Persamaan (2.35) dan Persamaan (2.36), maka hubungan masukan-keluaran sistem dan modelnya akan sama. *Error* merupakan selisih antara keluaran sistem *loop* tertutup (y) dengan keluaran model (y_m) yang dituliskan sebagai Persamaan (2.37).

$$e = y - y_m \quad (2.37)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (2.35), Persamaan (2.36), dan Persamaan (2.37) ke Persamaan (2.34), maka didapatkan persamaan (2.38).

$$y = \frac{bk_1}{p + a + bk_2} u_c \quad (2.38)$$

Dimana $p = d/dt$ adalah operator diferensial. Turunan kepekaan (*sensitivity derivative*) didapatkan dengan melakukan turunan parsial pada *error* terhadap parameter k_1 dan k_2 yang dituliskan pada Persamaan (2.39) dan Persamaan (2.40).

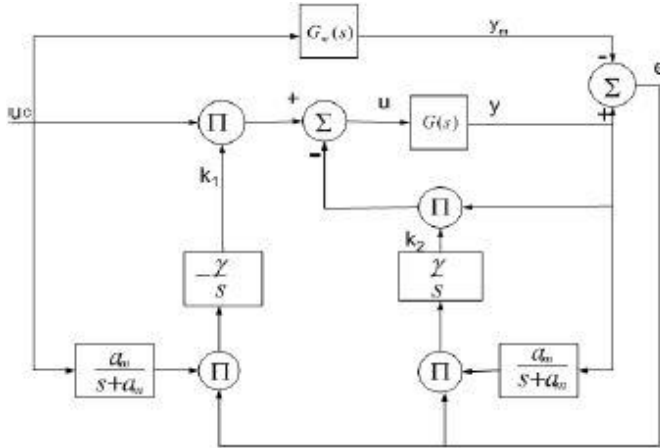
$$\frac{\partial e}{\partial k_1} = \frac{b}{p + a + bk_2} u_c \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial e}{\partial k_2} = - \frac{b}{p + a + bk_2} y \quad (2.40)$$

Kedua persamaan tersebut belum dapat digunakan secara langsung karena parameter a dan b tidak diketahui, untuk itu diperlukan pendekatan yang didasarkan pada pengamatan bahwa $p + a + bk_2 \approx p + a_m$ yang akan tercapai ketika parameter-parameter tepat pada harga yang sesuai. Dari Persamaan (2.38) dan pendekatan ini, diperoleh persamaan *updating* parameter-parameter kontroler:

$$\frac{dk_1}{dt} = -\gamma \left(\frac{a_m}{p + a_m} u_c \right) e \quad (2.41)$$

$$\frac{dk_2}{dt} = \gamma \left(\frac{a_m}{p + a_m} y \right) e \quad (2.42)$$



Gambar 2.12 Diagram Blok MRAC Orde Satu dengan *MIT Rule* [6]

Skema pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa *error* dihasilkan dari selisih antara keluaran model referensi (y_m) dan keluaran *plant* (y). *update* parameter kontroler k_2 dilakukan oleh hasil kali antara *error* (e), *gain* adaptasi (γ), dan keluaran *plant* (y) setelah melalui filter $\frac{a_m}{s+b_m}$, sedangkan parameter k_1 dilakukan *update* melalui hasil kali *error* (e), *gain* adaptasi, dan referensi masukan (u_c) setelah melewati filter.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini dibahas mengenai perancangan sistem pengaturan *level* fluida pada simulator *plant Coupled Tanks*. Dimulai dari pemodelan *plant Coupled Tanks* hingga perancangan kontroler PI dengan teknik MRAC.

3.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem yang saya buat merupakan sistem pengaturan *level* pada *Coupled Tanks*. Aplikasi dari *Coupled Tanks* ini ada pada industri kimia sebagai regulator ketinggian fluida. Model *Coupled Tanks* yang digunakan adalah nonlinier karena kontroler yang digunakan adalah kontroler adaptif. Untuk mengurangi hubungan interaksi antar input dan output maka digunakan cara *decoupling*. Hal ini bertujuan untuk mengubah struktur *plant* dari MIMO menjadi SISO. Kontroler MRAC menggunakan *adjustment parameter* yang sesuai dengan desain kontroler PI. Penentuan *gain adaptation* adalah dengan melakukan penurunan persamaan sesuai aturan *MIT Rule*. Sistem ini disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

3.2 Pemodelan *Coupled Tanks*

Pemodelan *Coupled Tanks* diperlukan sebagai langkah awal perancangan kontroler MRAC PI. Model *plant* yang digunakan adalah model nonlinier karena menggunakan kontroler adaptif. Tahapan pertama yang dilakukan adalah memodifikasi persamaan nonlinier *plant* pada Persamaan (2.21) dan Persamaan (2.22) menjadi Persamaan (3.1) dan (3.2).

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{Q_{i1} - \alpha_1\sqrt{H_1} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2}}{A_1} \quad (3.1)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{Q_{i2} - \alpha_2\sqrt{H_2} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2}}{A_2} \quad (3.2)$$

Dari persamaan nonlinier tersebut selanjutnya dibuat diagram blok di perangkat lunak MATLAB dengan bantuan Simulink. Diagram *simulink plant Coupled Tanks* dapat dilihat pada Gambar 3.1.

output *plant*. Hal yang harus dilakukan adalah membuat parameter baru untuk disubstitusi ke dalam persamaan nonlinier. Parameter tersebut diberi notasi β_1 dan β_2 . Kemudian dilakukan substitusi parameter tersebut ke dalam Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2).

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{Q_{i1} - \alpha_1\sqrt{H_1} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2}}{A_1} + \beta_1 H_1 - \beta_1 H_1 + u_1\beta_1 - u_1\beta_1 \quad (3.3)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{Q_{i2} - \alpha_2\sqrt{H_2} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2}}{A_2} + \beta_2 H_2 - \beta_2 H_2 + u_2\beta_2 - u_2\beta_2 \quad (3.4)$$

Agar bagian linier dapat dihilangkan, maka Persamaan (3.3) dibuat menjadi Persamaan (3.5) dan Persamaan (3.6).

$$\frac{Q_{i1} - \alpha_1\sqrt{H_1} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2}}{A_1} + \beta_1 H_1 - u_1\beta_1 = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{dH_1}{dt} = u_1\beta_1 - \beta_1 H_1 \quad (3.6)$$

Hal ini dilakukan juga pada Persamaan (3.4) sehingga menjadi Persamaan (3.7) dan Persamaan (3.8).

$$\frac{Q_{i2} - \alpha_2\sqrt{H_2} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2}}{A_2} + \beta_2 H_2 - u_2\beta_2 = 0 \quad (3.7)$$

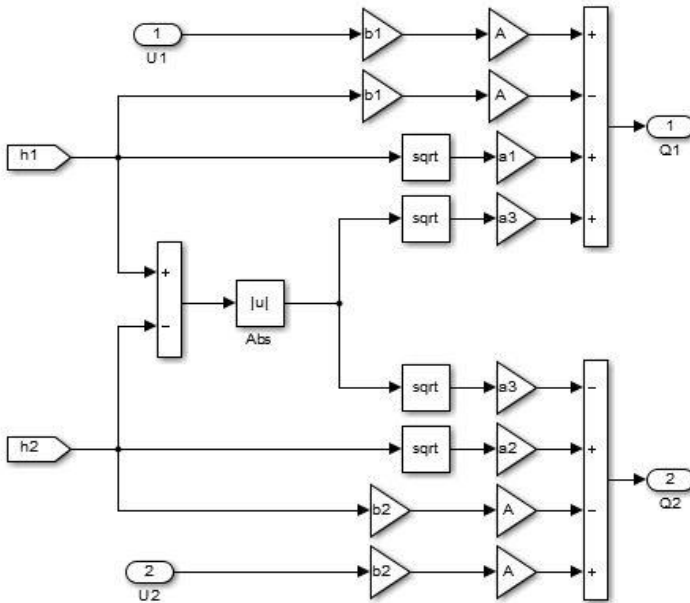
$$\frac{dH_2}{dt} = -\beta_2 H_2 + u_2\beta_2 \quad (3.8)$$

Kemudian Persamaan (3.7) dan Persamaan (3.8) disederhanakan menjadi Persamaan (3.9) dan Persamaan (3.10).

$$Q_{i1} = A_1(u_1\beta_1 - \beta_1 H_1) + \alpha_1\sqrt{H_1} + \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2} \quad (3.9)$$

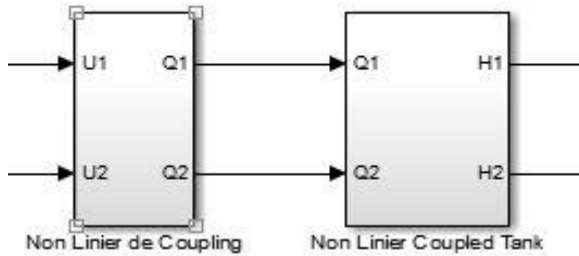
$$Q_{i2} = A_2(u_2\beta_2 - \beta_2 H_2) + \alpha_2\sqrt{H_2} - \alpha_3\sqrt{H_1 - H_2} \quad (3.10)$$

Dari Persamaan (3.9) dan Persamaan (3.10) dibuat diagram *simulink decoupler plant* pada perangkat lunak MATLAB. Gambar 3.2 merupakan diagram *simulink decoupler plant* yang digunakan.



Gambar 3.2 Diagram *Simulink Decoupler Plant*

Nilai β_1 dan β_2 yang digunakan adalah masing-masing 1. Kedua nilai ini mempengaruhi kecepatan respon sistem. Semakin besar nilai β_1 dan β_2 , maka respon sistem semakin cepat. Diagram *simulink* ini nantinya digabungkan dengan diagram *simulink nonlinier plant* menjadi seperti Gambar 3.3. Keluaran *decoupler* adalah Q_1 dan Q_2 . Keduanya terhubung dengan masukan *plant nonlinier*. Tidak digunakannya fungsi alih bertujuan agar saat dilakukan pembebanan, tidak perlu mengubah nilai fungsi alih tersebut. Untuk pembebanan hanya perlu mengubah nilai parameter *plant coupled tanks*.



Gambar 3.3 Diagram *Simulink Decoupling* dengan *Plant*

Subsistem Nonlinier *decoupling* dibuat dari Persamaan (3.9) dan Persamaan (3.10) sedangkan subsistem nonlinier *Coupled Tanks* dibuat dari Persamaan (3.1) dan (3.2).

Dengan mengubah Persamaan (3.6) ke dalam domain s maka didapatkan Persamaan (3.10) yang kemudian disederhanakan menjadi Persamaan (3.11) dan Persamaan (3.12).

$$sH_1(s) = -\beta_1 H_1(s) + \beta_1 u_1(s) \quad (3.10)$$

$$(s + \beta_1)H_1(s) = \beta_1 u_1(s) \quad (3.11)$$

$$\frac{H_1(s)}{u_1(s)} = \frac{1}{(s + 1)} \quad (3.12)$$

Hal ini dilakukan juga pada Persamaan (3.8) sehingga didapatkan Persamaan (3.13) sebagai berikut.

$$\frac{H_2(s)}{u_2(s)} = \frac{1}{(s + 1)} \quad (3.13)$$

3.4 Perancangan MRAC PI [6] [7]

Model MRAC telah dijelaskan pada bab 2 dimana *adaptation mechanism* akan menentukan nilai parameter kontroler. Pada perancangan ini kontroler yang digunakan adalah kontroler proporsional integral (PI). Bentuk umum persamaan kontroler PI telah dijelaskan pada

Persamaan (2.29). Fungsi kontroler PI dalam domain s adalah sebagai berikut.

$$u(s) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} \right] e(s) \quad (3.14)$$

Dengan merujuk pada Persamaan (3.12) dan Persamaan (3.13) maka bentuk *plant* yang digunakan adalah orde satu, hubungan antara *input-output* menjadi Persamaan (3.15).

$$\frac{y(s)}{u_c(s)} = \frac{b}{s + a} \quad (3.15)$$

Dari Persamaan (3.14) dan Persamaan (3.15) dapat dibentuk struktur sistem menjadi Persamaan (3.16).

$$\frac{y(s)}{u_c(s)} = \frac{b(K_p s + K_i)}{s^2 + s(a + bK_p) + bK_i} \quad (3.16)$$

Sehingga persamaan model referensi MRAC menjadi Persamaan (3.17).

$$\frac{y_m(s)}{u_c(s)} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \quad (3.17)$$

Untuk mendapatkan parameter kontroler perlu diterapkan *MIT Rule* seperti yang telah dijelaskan di Bab 2. Parameter kontroler dalam vector adalah $u = [K_p \ K_i]$. *MIT Rule* dapat dipisahkan menjadi dua bagian yaitu Persamaan (3.18) dan Persamaan (3.19).

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \left(\frac{\partial J}{\partial K_p} \right) = -\gamma_p \left(\frac{\partial J}{\partial e} \right) \left(\frac{\partial e}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial K_p} \right) \quad (3.18)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \left(\frac{\partial J}{\partial K_i} \right) = -\gamma_i \left(\frac{\partial J}{\partial e} \right) \left(\frac{\partial e}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial K_i} \right) \quad (3.19)$$

Dengan mengetahui bahwa $e = y - y_m \rightarrow \frac{\partial e}{\partial y} = 1$ dan $\frac{\partial J}{\partial e} = e$. Maka Persamaan (3.15) dan Persamaan (3.16) menjadi Persamaan (3.20) dan Persamaan (3.21).

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \left(\frac{\partial J}{\partial K_p} \right) = -\gamma_p e \left(\frac{\partial y}{\partial K_p} \right) \quad (3.20)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \left(\frac{\partial J}{\partial K_i} \right) = -\gamma_i \left(\frac{\partial y}{\partial K_i} \right) \quad (3.21)$$

Untuk menemukan nilai $\frac{\partial y}{\partial K_p}$ dan $\frac{\partial y}{\partial K_i}$, Persamaan (3.14) dapat diubah menjadi Persamaan (3.22) dan didiferensialkan terhadap K_p dan K_i menjadi Persamaan (3.23) dan Persamaan (3.24).

$$y(a_{m0}s^2 + s(a + bK_p) + bK_i) = b(K_p s + K_i)u_c \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial y}{\partial K_p} = b \frac{s}{a_{m0}s^2 + s(a + bK_p) + bK_i} (u_c - y) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial y}{\partial K_i} = b \frac{1}{a_{m0}s^2 + s(a + bK_p) + bK_i} (u_c - y) \quad (3.24)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (3.20) dan Persamaan (3.21) ke dalam Persamaan (3.15) dan Persamaan (3.16) maka didapatkan Persamaan (3.25) dan Persamaan (3.26) untuk mencari nilai adaptasi.

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p e \frac{bs}{a_{m0}s^2 + s(a + bK_p) + bK_i} (u_c - y) \quad (3.25)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i e \frac{b}{a_{m0}s^2 + s(a + bK_p) + bK_i} (u_c - y) \quad (3.26)$$

Dengan menyatakan bahwa $a_{m1} = a + bK_p$ dan $a_{m2} = bK_i$. Sehingga didapatkan persamaan parameter kontroler yaitu Persamaan (3.27).

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p e \frac{bs}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} (u_c - y) \quad (3.27)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i e \frac{b}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} (u_c - y) \quad (3.28)$$

Pada perancangan ini dipilih *model reference* tangki 1 dan tangki 2 dengan fungsi alih pada Persamaan (3.29) untuk tangki 1 dan Persamaan (3.30) untuk tangki 2.

$$\frac{y_{m1}(s)}{u_{c1}(s)} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \quad (3.29)$$

$$\frac{y_{m2}(s)}{u_{c2}(s)} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \quad (3.30)$$

Model reference yang dirancang memiliki karakteristik sistem orde satu dengan konstanta waktu 5 untuk tangki 1 dan 10 untuk tangki 2. Persamaan (3.29) dan Persamaan (3.30) menjadi Persamaan (3.31) dan Persamaan (3.31) untuk tangki 1 dan Persamaan (3.32) untuk tangki 2.

$$\frac{y_{m1}(s)}{u_{c1}(s)} = \frac{1}{5s + 1} \quad (3.31)$$

$$\frac{y_{m2}(s)}{u_{c2}(s)} = \frac{1}{10s + 1} \quad (3.32)$$

Setelah diketahui *model reference* yang diinginkan, maka bisa dibuat persamaan parameter kontroler yang berhubungan dengan *model reference*. Dari Persamaan (3.31) dan Persamaan (3.32) diketahui bahwa nilai a_{m1} dan a_{m2} masing-masing adalah 5 dan 1 untuk tangki 1, sedangkan untuk tangki 2 adalah 10 dan 1. Nilai b didapatkan dari Persamaan (3.12) dan Persamaan (3.13) dimana b adalah β_1 dan β_2 yang nilainya masing-masing adalah 1. Persamaan parameter kontroler untuk tangki 1 dapat dituliskan menjadi Persamaan (3.33) untuk Kp dan Persamaan (3.34) untuk Ki.

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p e \frac{s}{5s + 1} (u_c - y) \quad (3.33)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i e \frac{1}{5s + 1} (u_c - y) \quad (3.34)$$

Persamaan parameter kontroler untuk tangki 1 dapat dituliskan menjadi Persamaan (3.35) untuk K_p dan Persamaan (3.36) untuk K_i .

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p e \frac{s}{10s + 1} (u_c - y) \quad (3.35)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i e \frac{1}{10s + 1} (u_c - y) \quad (3.36)$$

Pada perancangan ini dilakukan *trial-and-error* untuk menentukan nilai γ_p dan γ_i yang tepat sehingga keluaran sistem bisa mendekati atau sama dengan keluaran *model reference*. Dengan mengacu pada diagram blok di Gambar 3.3, sistem pengaturan *level coupled tanks* ini disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 4

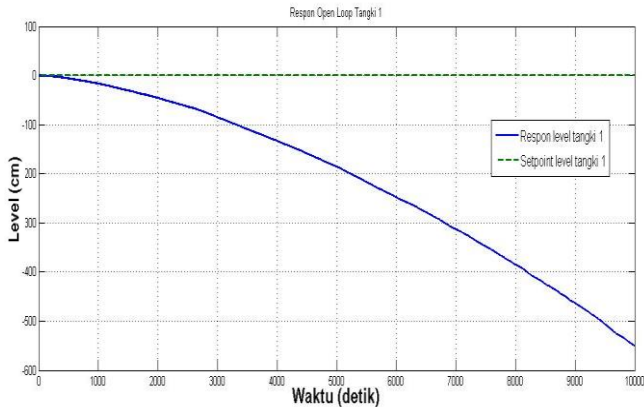
PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem

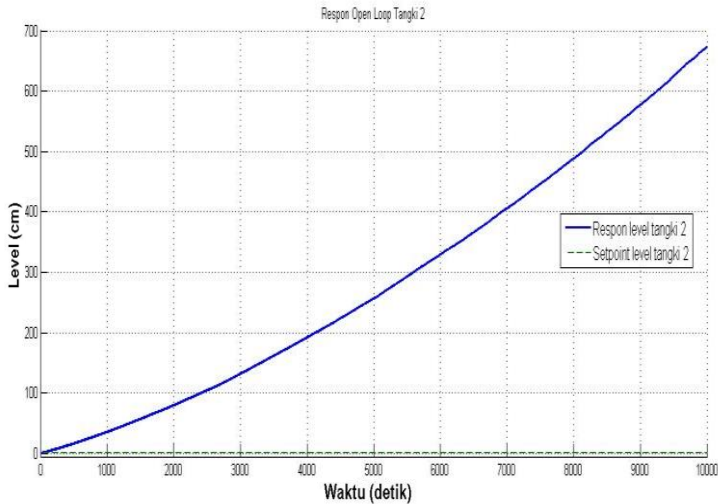
Pada tahap ini dilakukan beberapa pengujian. Pengujian pertama merupakan pengujian sistem secara *open loop*. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan *input step* pada *Coupled Tanks* dan dilihat hasil respon *level* di tangki 1 dan tangki 2. Pengujian kedua merupakan pengujian dengan menambahkan rangkaian *decoupling* pada *Coupled Tanks*. Pengujian *Decoupling* dilakukan dengan memberikan *setpoint* berupa *uniform random number* secara bergantian untuk mengetahui apakah interaksi antara kedua tangki sudah berhasil dikurangi atau dihilangkan. Pengujian ketiga merupakan pengujian dengan menggunakan MRAC PI yang telah dirancang. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan nilai *gain* adaptasi yang telah ditentukan untuk mengatur *level* pada *coupled tanks*. Pengujian keempat adalah pengujian *tracking* MRAC PI untuk *setpoint* yang berubah-ubah.

4.2 Pengujian Open Loop

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan masukan (*input*) berupa sinyal *step* ke model *coupled tanks* yang ada di Gambar 3.1. Untuk masukan u_1 diberi penguatan 0 dan untuk masukan u_2 diberi penguatan 2.



Gambar 4.1 Respon *Open Loop* Tangki 1

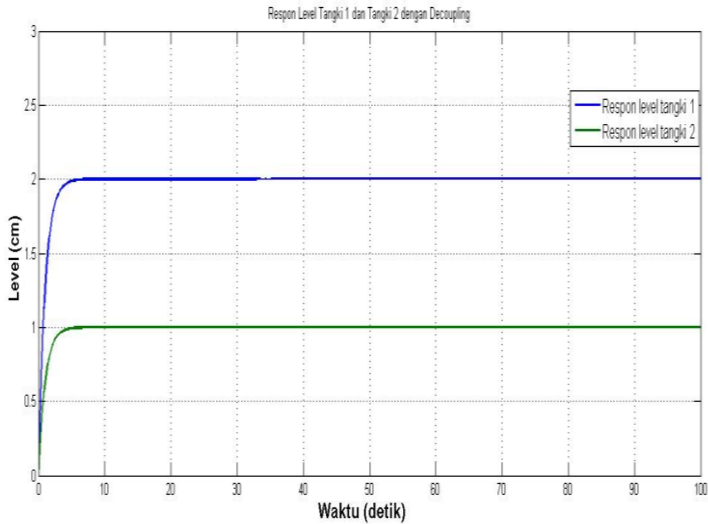


Gambar 4.2 Respon *Open Loop* Tangki 2

Dari Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai *level* di tangki 1 maupun tangki 2 tidak menuju nilai referensi. Dapat diketahui juga bahwa terdapat interaksi antara kedua tangki oleh karena itu perlu dilakukan *decoupling* untuk mengurangi atau menghilangkan interaksi tersebut sehingga *plant coupled tanks* dapat dikontrol.

4.3 Pengujian *Decoupling*

Pada pengujian ini diagram *Simulink* yang ada pada Gambar 3.1 digabungkan dengan diagram *Simulink* yang ada pada Gambar 3.2. Terdapat dua pengujian yang pertama adalah pengujian dilakukan dengan memberikan masukan berupa *unit step* dengan penguatan di tangki 1 yaitu 2 dan di tangki 2 yaitu 1. Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan masukan berupa *random uniform number* secara bergantian menuju ke *plant coupled tanks* yang telah digabungkan dengan *decoupler*. *Random uniform number* yang digunakan adalah dengan nilai simpangan 0,1. Artinya bisa berkurang 0,1 atau bertambah 0,1 dengan *sampling time* 0,1 detik.



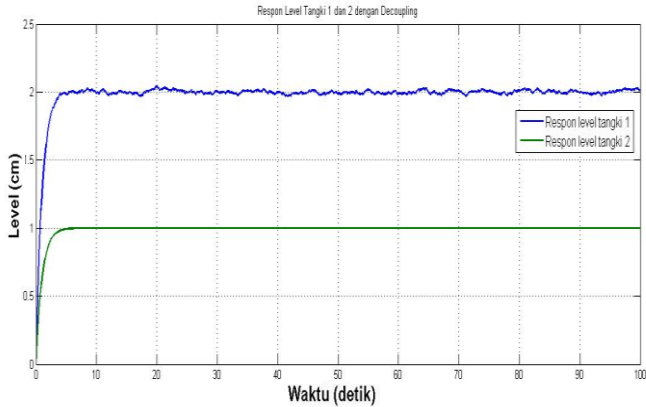
Gambar 4.3 Respon *Level* dengan *Decoupling*

Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa respon *level* kedua tangki telah berhasil menuju nilai referensi yang berupa *unit step* dengan *gain*. Nilai karakteristik *transient* dari respon tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1.

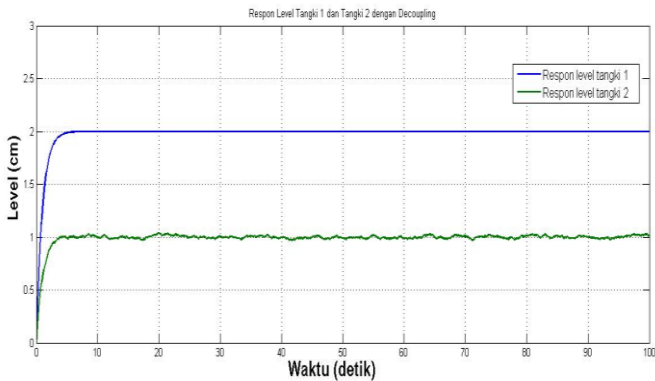
Tabel 4.1 Karakteristik *Transient Level* dengan *Decoupling*

Karakteristik	Tangki 1	Tangki 2
Ess	$8,8818 \times 10^{-16}$	$5,5511 \times 10^{-16}$
<i>Settling Time</i> (detik)	4	4
<i>Rise Time</i> (detik)	2,1972	2,1972
<i>Delay Time</i> (detik)	0,6931	0,6931

Dari nilai respon *transient* dapat dikatakan bahwa *plant* dengan *decoupling* memiliki hasil yang bagus. Nilai Ess bisa dikatakan mendekati nol yaitu dengan enam belas angka di belakang koma. Begitu pula dengan *settling time*, respon mencapai nilai *steady state* ($\pm 2\%$) hanya dalam waktu 4 detik.



Gambar 4.4 Respon *Level Decoupling* dengan *Input Random Number* di u_1

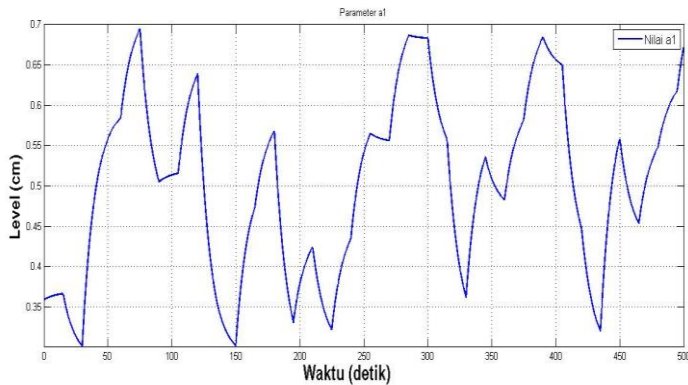


Gambar 4.5 Respon *Level Decoupling* dengan *Input Random Number* di u_2

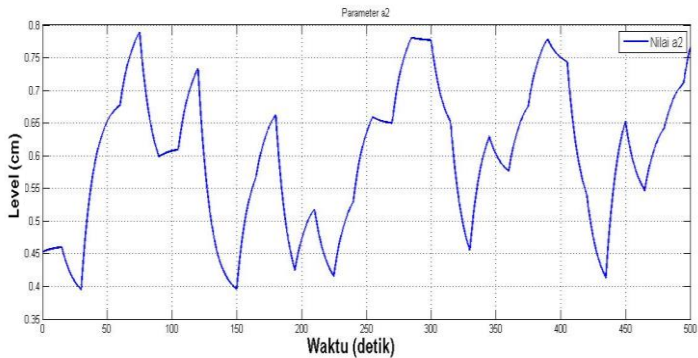
Dari Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa pemberian *uniform random number* pada tangki 1 tidak berpengaruh terhadap keluaran tangki 2 dan juga sebaliknya. Hal ini membuktikan bahwa hubungan interaksi antara tangki 1 dan tangki 2 telah berhasil dipisahkan. Selain itu dapat pula diamati dari Tabel 4.1 bahwa karakteristik respon *transient* bisa dikatakan cepat dengan nilai *settling time* hanya 4 detik.

Tetapi salah satu parameter kontroler yang baik adalah kemampuan saat diberi beban.

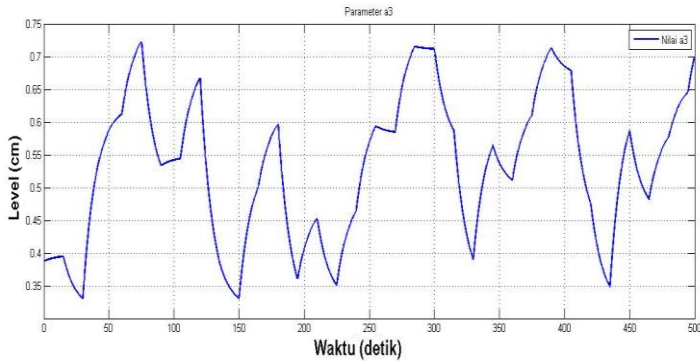
Beban pada sistem pengaturan ini adalah bukaan *valve* yang nilainya berubah-ubah. Terdapat tiga *valve* yang nilainya berubah-ubah yaitu α_1 , α_2 , dan α_3 yang masing-masing menyatakan bukaan (%) *valve out* tangki 1, *valve out* tangki 2, dan *valve* antara tangki 1 dan tangki 2. Nilai beban dapat dilihat pada Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8.



Gambar 4.6 Parameter Bukaan *Valve Out* Tangki 1

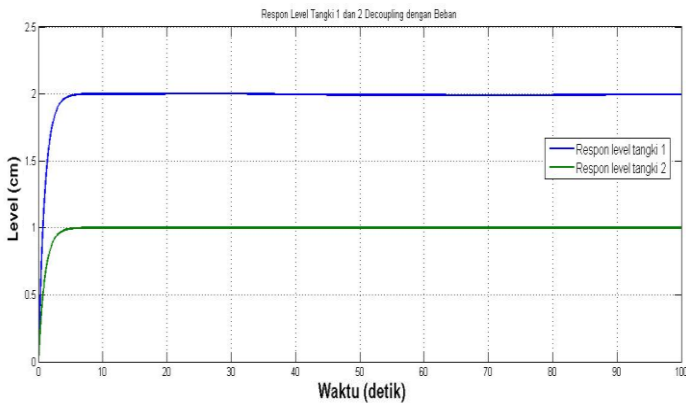


Gambar 4.7 Parameter Bukaan *Valve Out* Tangki 2



Gambar 4.8 Parameter Buka-an Valve antara Tangki 1 dan Tangki 2

Perubahan parameter-parameter ini dinamakan pembebanan. Pengujian selanjutnya adalah pemberian beban pada *decoupling*. Hasil pengujiannya adalah sebagai berikut.

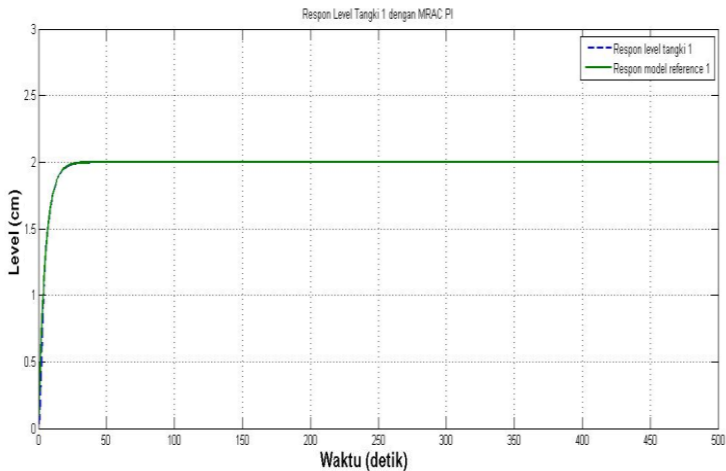


Gambar 4.9 Respon *Decoupling* dengan Beban

Dilihat dari Gambar 4.9, *decoupling* mampu mempertahankan nilai *setpoint* walaupun terjadi perubahan parameter *plant* setiap 15 detik. Hal ini menunjukkan bahwa *decoupling* bisa berfungsi sebagai kontroler karena bisa membuat keluaran sistem sesuai dengan referensi dan mempertahankan nilainya saat ada pembebanan.

4.4 Pengujian MRAC PI

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan kontroler MRAC PI yang telah dirancang di Bab 3 dengan *decoupling* dan *plant*. Setelah melalui *trial-and-error* nilai *gain* adaptasi terbaik yang diperoleh adalah γ_p dan γ_i masing-masing 1 dan 0,5. Hasil pengujiannya adalah sebagai berikut.

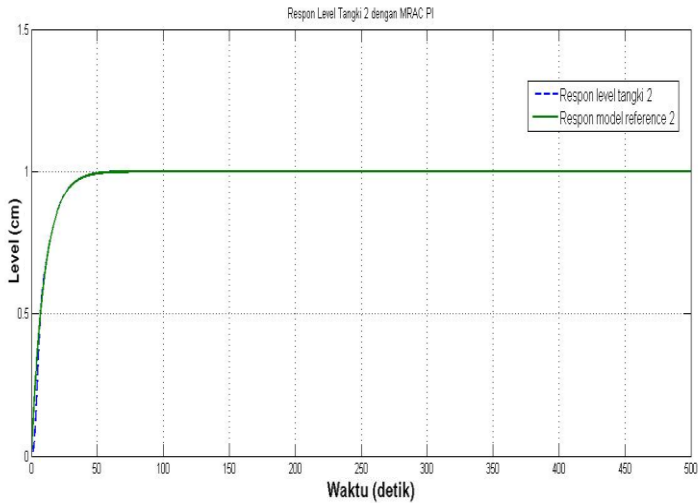


Gambar 4.10 Respon *Level* Tangki 1 dengan MRAC PI

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai keluaran sistem sudah mendekati nilai *output model reference*. Hal ini juga dibuktikan oleh karakteristik *transient* dari tangki 1 pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Karakteristik *Transient Level* Tangki 1

Karakteristik	Tangki 1
Ess	$7,0166 \times 10^{-14}$
<i>Settling Time</i> (detik)	19,68
<i>Rise Time</i> (detik)	10,8103
<i>Delay Time</i> (detik)	3,4103



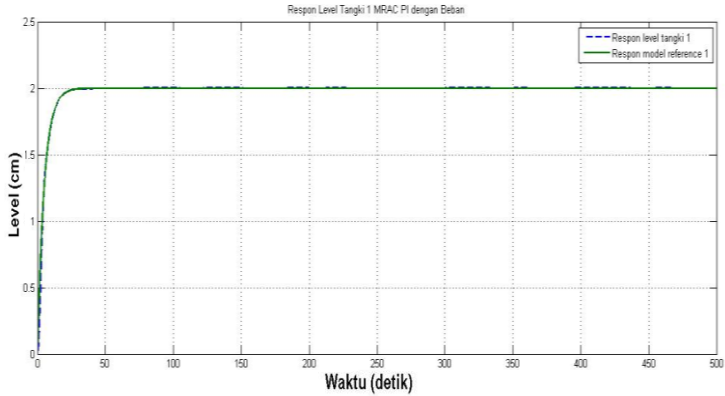
Gambar 4.11 Respon *Level* Tangki 2 dengan MRAC PI

Dari Gambar 4.11 dapat dilihat nilai output sistem sudah mendekati nilai *output model reference*. Hal ini ditunjukkan oleh karakteristik *transient* pada Tabel 4.3.

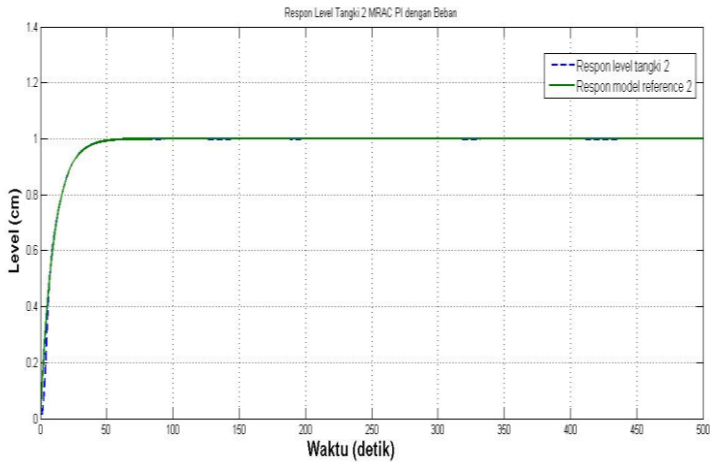
Tabel 4. 3 Karakteristik *Transient Level* Tangki 2

Karakteristik	Tangki 2
Ess	$7,8166 \times 10^{-14}$
<i>Settling Time</i> (detik)	39
<i>Rise Time</i> (detik)	21,4229
<i>Delay Time</i> (detik)	6,7582

Pengujian selanjutnya adalah MRAC PI yang diberi pembebanan. Nilai beban juga sama seperti pada pengujian *decoupling*. Bukan ketiga *valve* berubah nilainya setiap 15 detik.



Gambar 4.12 Respon *Level* Tangki 1 MRAC PI dengan Beban

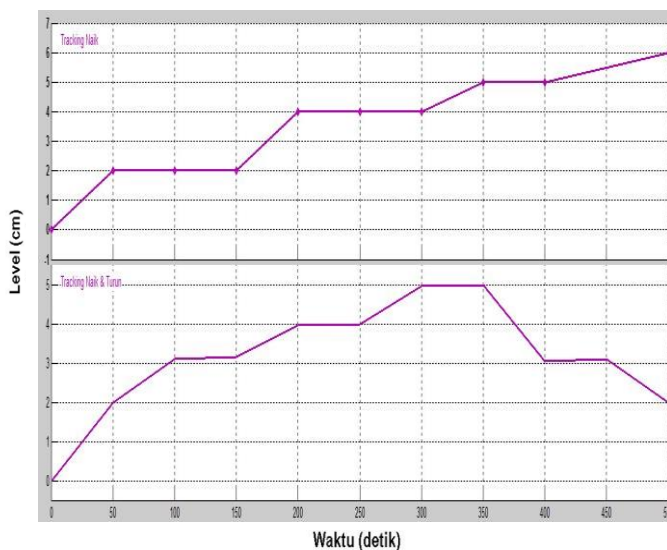


Gambar 4.13 Respon *Level* Tangki 2 MRAC PI dengan Beban

Dari kedua gambar di atas terlihat bahwa MRAC PI yang diberi beban tetap dapat mengembalikan nilainya ke nilai *model reference* masing-masing tangki. Hal ini menunjukkan bahwa MRAC PI yang dirancang berhasil memenuhi tujuannya. Untuk membandingkan seberapa besar pengaruh dari MRAC PI, dilakukan perbandingan dengan

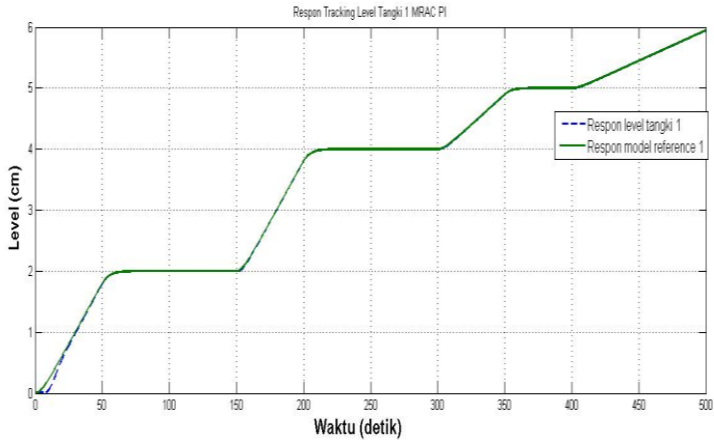
menghitung nilai RMSE (*root mean square error*) saat dilakukan pembebanan. Pada rancangan tanpa MRAC PI nilai RMSE yang didapat di tangki 1 adalah 0,0065 dan di tangki 2 adalah 0,00017. Pada rancangan dengan menggunakan MRAC PI didapatkan nilai RMSE di tangki 1 sebesar 0,0012 dan di tangki 2 adalah 0,000012. Hal ini menunjukkan bahwa adanya MRAC PI dapat mengurangi nilai *root mean square error* walaupun hanya sedikit.

Pengujian selanjutnya adalah melakukan *tracking* untuk nilai referensi yang berubah-ubah. Di pengujian ini digunakan *tools* berupa *signal builder* untuk membuat nilai referensi. Terdapat dua jenis pengujian yaitu dengan nilai referensi yang naik dan dengan nilai referensi yang naik dan turun. Nilai referensi yang ada pada *signal builder* dapat dilihat di Gambar 4.14.

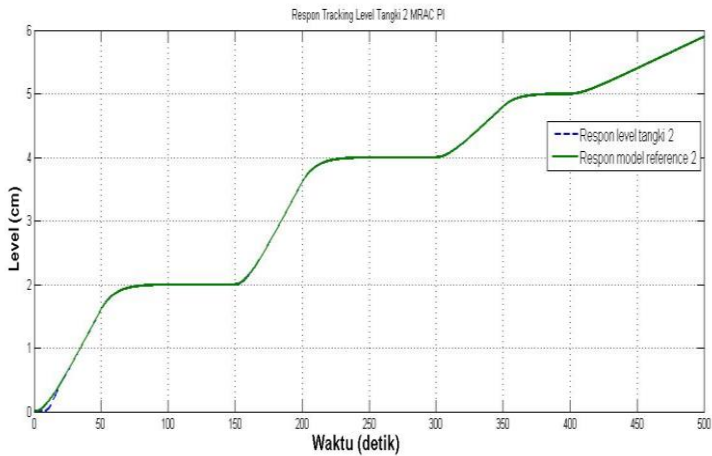


Gambar 4.14 *Signal Builder* untuk *Tracking Level*

Parameter kontrol MRAC PI yang digunakan tetap sama begitu juga dengan *model reference* yang digunakan pada masing-masing tangki. Berikut ini adalah hasil pengujian MRAC PI untuk *tracking* nilai referensi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.15 untuk tangki 1 dan Gambar 4.16 untuk tangki 2.



Gambar 4.15 Respon *Tracking Level Tangki 1 Referensi Naik*

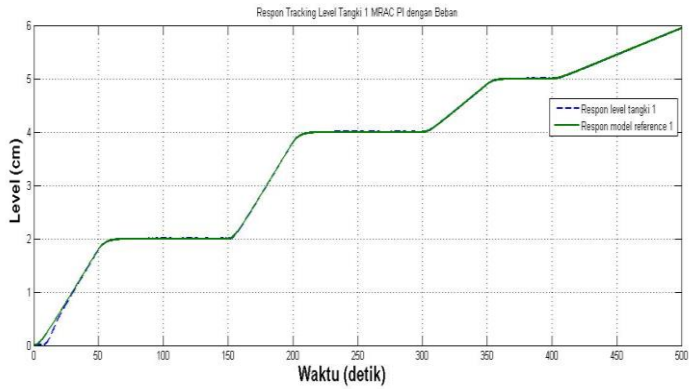


Gambar 4.16 Respon *Tracking Level Tangki 2 Referensi Naik*

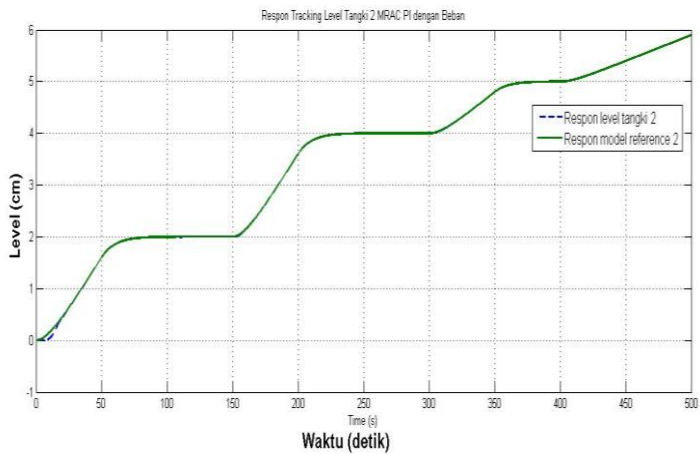
Dari Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 didapat nilai RMSE untuk tangki 1 adalah 1,8% dan RMSE untuk tangki 2 adalah 2,1%. Pada kedua tangki juga dapat dilihat terjadi proses adaptasi di detik ke 15 sebelum akhirnya respon *level* bisa mengikuti respon *model reference* hingga detik

ke 500. Dari nilai RMSE yang didapat bisa disimpulkan bahwa *tracking* telah dilakukan dengan baik.

Untuk menilai apakah MRAC PI ini sudah dirancang dengan baik, maka perlu juga dilakukan pengujian dengan melakukan pembebanan. Beban yang diberikan sama dengan pengujian-pengujian sebelumnya.



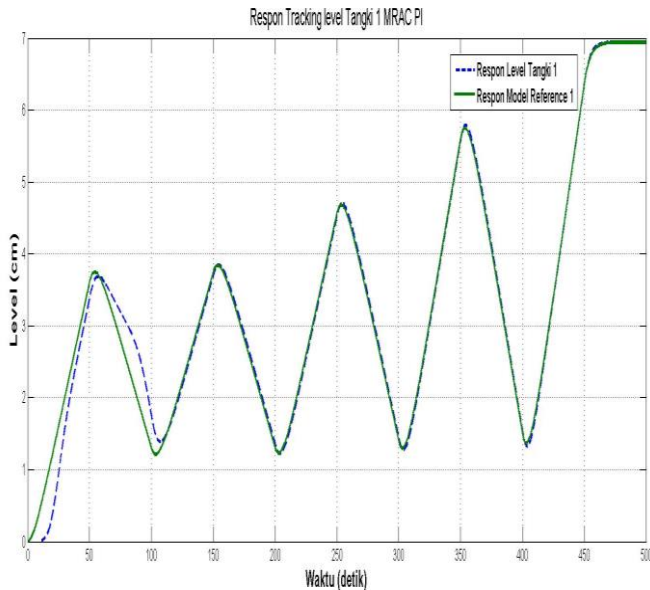
Gambar 4.17 Respon *Tracking Level* Tangki 1 MRAC PI dengan Beban



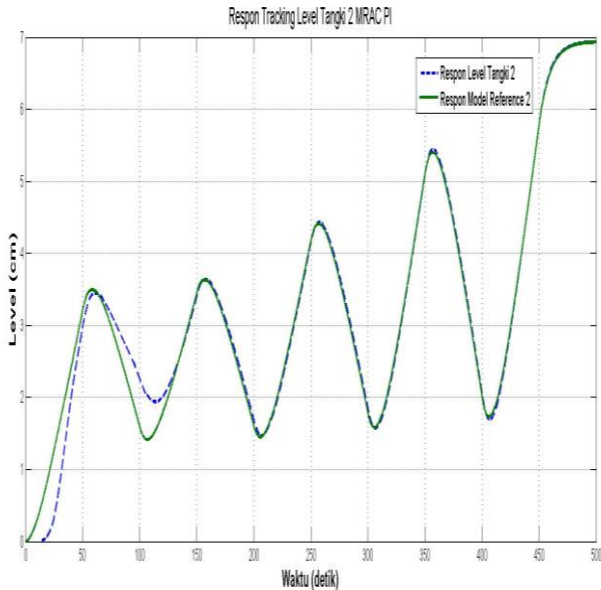
Gambar 4.18 Respon *Tracking Level* Tangki 2 MRAC PI dengan Beban

Dari kedua gambar di atas terlihat bahwa pembebanan yang terjadi juga bisa dikembalikan ke nilai referensi oleh MRAC PI. Nilai RMSE yang didapat saat keadaan tanpa beban dan dengan beban adalah sama. Hal ini menunjukkan bahwa untuk *tracking* nilai referensi naik, MRAC PI yang dirancang telah berhasil sesuai dengan tujuan. Pada 15 detik pertama sinyal keluaran sistem mengalami *lagging* yang diakibatkan karena proses adaptasi yang dilakukan kontroler. *Error* yang didapatkan, digunakan untuk mengubah nilai parameter kontroler hingga nilai *error* yang didapatkan sangat kecil.

Pengujian terakhir adalah melakukan *tracking* referensi dengan nilai yang naik dan kemudian turun. Sama dengan pengujian *tracking* saat referensi naik, pengujian ini menggunakan *signal builder*. Bentuk sinyalnya ada pada Gambar 4.14. Hasil yang didapat dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4.19 untuk tangki 1 dan Gambar 4.20 untuk tangki 2.

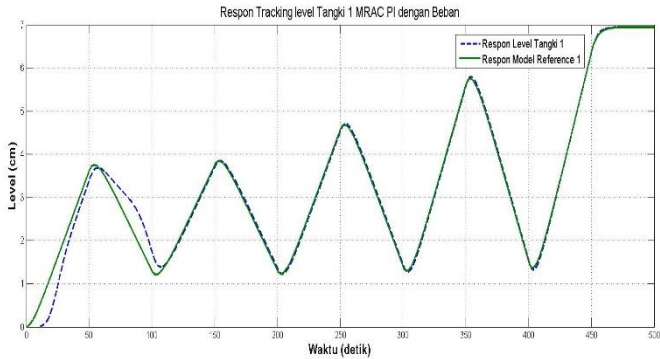


Gambar 4.19 Respon *Tracking Level* Tangki 1 dengan Referensi Naik dan Turun

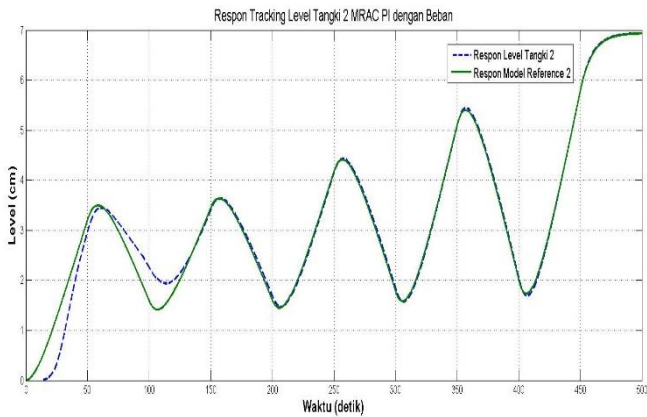


Gambar 4.20 Respon *Tracking Level* Tangki 2 dengan Referensi Naik dan Turun

Dari kedua gambar di atas didapatkan nilai RMSE untuk tangki 1 dari detik 1 hingga 113 adalah 21% dan untuk tangki 2 adalah 23,4%. Sedangkan RMSE untuk tangki 1 dari detik 113 hingga 500 adalah 4,2% dan untuk tangki 2 adalah 6,2%. Pada saat nilai referensi naik di awal, kontroler melakukan proses adaptasi parameter. Hal ini ditunjukkan dengan semakin kecilnya *error* yang terjadi. Pada saat nilai referensi turun, terjadi *error* yang besar. Nilai keluaran sistem berada hampir 0,5 lebih tinggi dari referensi. Hal ini terjadi karena dual hal pertama yaitu kontroler masih tidak terlalu cepat untuk melakukan adaptasi dan kedua karena *coupled tanks* tidak memiliki mekanisme pembuangan tambahan. Setelah detik ke 113, nilai RMSE pada kedua tangki menurun drastis hal ini terjadi karena kontroler telah selesai melakukan adaptasi sehingga *error* yang terjadi sudah berkurang dibanding saat keadaan awal.



Gambar 4.21 Respon *Tracking Level* Tangki 1 dengan Referensi Naik Turun dan Beban



Gambar 4.22 Respon *Tracking Level* Tangki 2 dengan Referensi Naik Turun dan Beban

Hasil yang sama dengan pengujian pembebanan sebelumnya, Pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22, nilai RMSE yang didapat sama dengan saat keadaan tanpa beban. Hal ini juga menunjukkan bahwa pembebanan pada *tracking* tidak memiliki dampak apapun.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5

PENUTUP

Hasil dari perancangan dan penelitian Tugas Akhir dirangkum dan dirumuskan kesimpulan. Kesimpulan ini menerangkan hasil dari pengujian dan simulasi yang telah dilaksanakan.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Sistem pengaturan *level* dengan kontroler MRAC PI dapat melakukan regulasi yaitu menjaga nilai *level* sesuai dengan nilai referensi baik saat keadaan normal maupun saat terjadi pembebanan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *error steady state* yang mendekati nol di kedua tangki saat keadaan tanpa pembebanan. Pada saat terjadi pembebanan, nilai RMSE berada pada nilai 0,1% untuk tangki 1 dan 0,01% untuk tangki 2. Nilai *gain* adaptasi terbaik γ_p dan γ_i adalah masing-masing 1 dan 0,5.
- b. Terjadinya *lagging* pada nilai keluaran sistem adalah karena proses adaptasi yang dilakukan kontroler. Nilai *error* yang disebabkan *lagging* ini digunakan oleh kontroler untuk melakukan adaptasi sehingga nilai *error* tidak muncul saat *steady state*. Proses adaptasi ini dipengaruhi oleh nilai γ_i untuk mempercepat respon sistem.
- c. Sistem pengaturan *level* dengan kontroler MRAC PI untuk keperluan *tracking* dengan nilai referensi naik dapat melakukan tugasnya dengan baik. Hal ini ditunjukkan oleh nilai RMSE 1,8% untuk tangki 1 dan 2,1% untuk tangki 2.
- d. Untuk keperluan *tracking* dengan nilai referensi naik dan turun, kontroler yang dirancang masih kurang cepat dalam melakukan adaptasi. Hal ini ditunjukkan oleh besarnya nilai RMSE di 113 detik awal dimana RMSE di tangki 1 adalah 21% dan di tangki 2 adalah 23,4%. Namun dari detik 113 hingga 500 nilai RMSE berkurang dimana untuk tangki 1 adalah 4,2% dan di tangki 2 adalah 6,2%.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan, untuk pengembangan berikutnya, diperlukan suatu metode pasti yang dapat menentukan *gain* adaptif karena proses *trial-and-error* belum tentu mendapatkan hasil yang terbaik. Pengembangan dengan metode *genetic algorithm* mungkin bisa diterapkan untuk mendapatkan parameter kontroler MRAC PI.

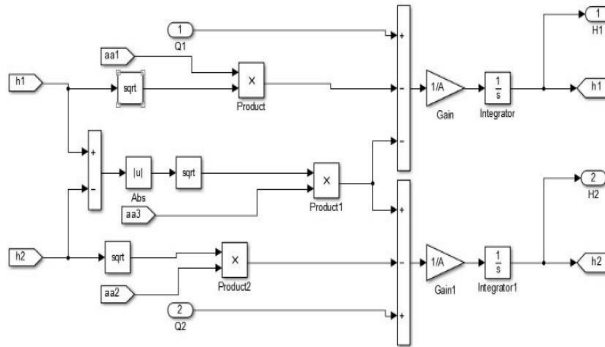
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saad, M., Albagul., and Abueejela, Y., "Performance Comparison Between PI and MRAC for Coupled-Tank System", *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 2 No. 3, Hal. 317-321, College of Electronic Technology, Libya, 2014
- [2] Astrom, K.J., and Wittenmark, Bjorn "*Adaptive Control*", Department of Automatic Control, Sweden, 2006
- [3] Gamayanti, Nurlita "*Diktat Kuliah Dasar Sistem Pengaturan*". Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2011
- [4] Numsomran, Arjin., Suksri, Tianchai., And Thumma, Maitree "Design of 2-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process", *International Conference on Control, Automation and Systems*, Vol 7, Hal. 339-344, Pathumwan Institute of Technology, Thailand, 2007
- [5] Rusmawan, Ferry "Aplikasi Kendali Adaptif Pada Sistem Pengaturan Temperatur Cairan Dengan Tipologi Kendali MRAC" *Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro*, Semarang, 2011
- [6] Kumarsar, Sumit "MRAC Base PI Controller for Speed Control of D.C Motor Using Lab View", *WSEAS Transactions on Systems and Control*, Vol. 9, Hal. 10-15, National Institute of Technology Kurukshetra, India, 2014
- [7] P, Boonsrimuang "Design of PI Controller Using MRAC Techniques for Couple-Tanks Process", *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol. 3 No.11, Hal. 1385-1390, Malavia Regional Engineering College, India, 2014

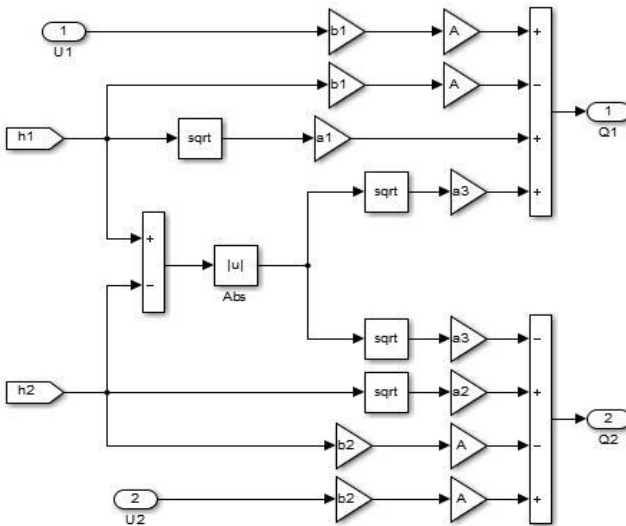
--Halaman ini sengaja dikosongkan--

LAMPIRAN A

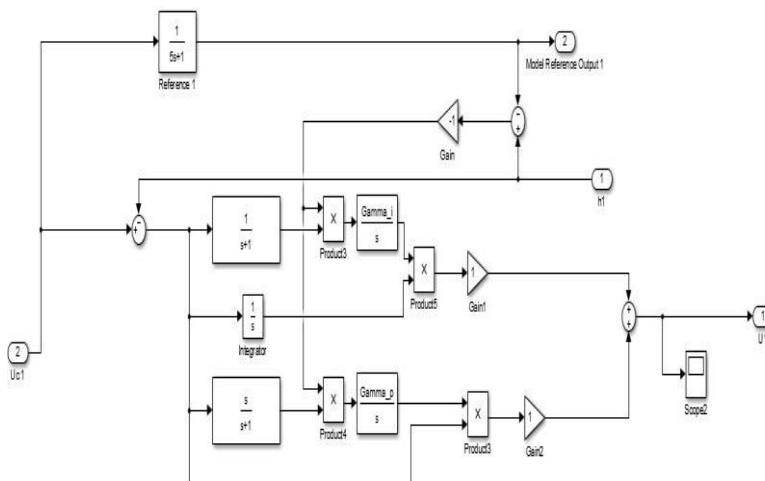
A1. Simulink Plant



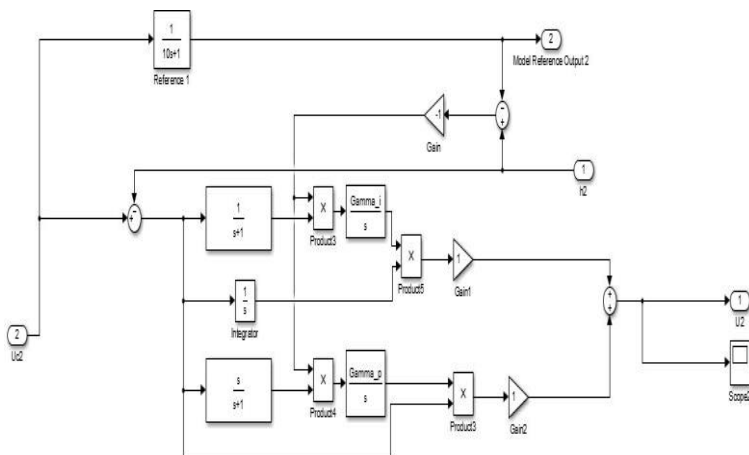
A2 Simulink Decoupler



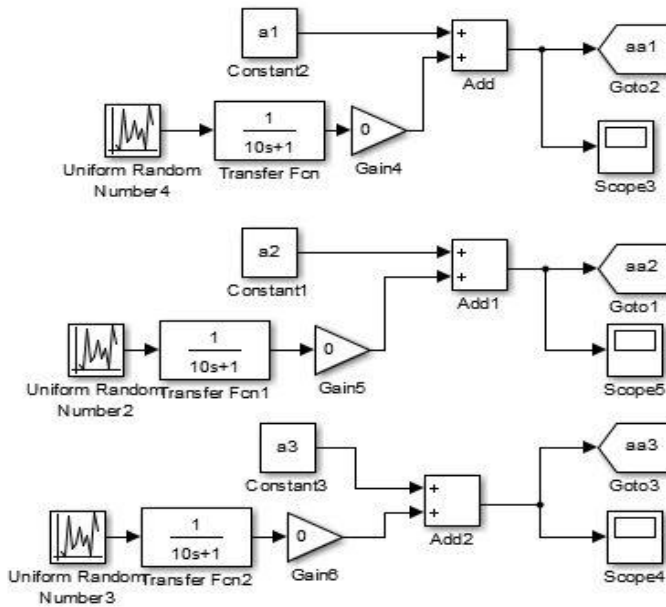
A3. Simulink MRAC Tangki 1



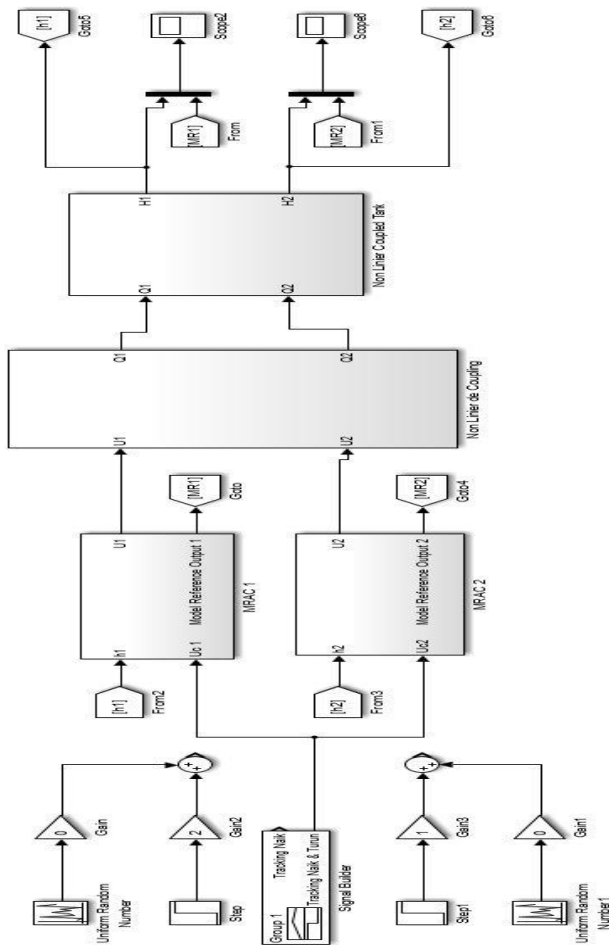
A4. Simulink MRAC Tangki 2



A5. Simulink Perubahan Beban



A6. Simulink Sistem Pengaturan Level



LAMPIRAN B

B1. Script Plant

```
%parameter plant coupled tanks  
A = 66.25;  
a1 = 0.359;  
a2 = 0.4528;  
a3 = 0.3875;  
b1 = 1;  
b2 = 1;
```

B2. Script MRAC

```
%parameter gain adaptasi MRAC  
Gamma_P = 1;  
Gamma_i = 0.5;
```

--halaman ini sengaja dikosongkan--

RIWAYAT PENULIS



Fahd Farras Mahmod, biasa dipanggil Farras oleh teman-temannya lahir di Jakarta, 1 November 1994. Farras merupakan anak kedua dari pasangan Mahmudun dan Vivid Sugiharti. Lulus dari SDI Asyafiiyah 02 pada tahun 2006, kemudian melanjutkan studi ke jenjang lebih lanjut di SMPN 109 Jakarta dan lulus pada tahun 2009.

Kemudian melanjutkan ke SMAN 12 Jakarta dan lulus pada tahun 2012. Setelah menembuh studi pada tingkat SMA, penulis melanjutkan ketingkat lebih lanjut, yaitu di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro pada tahun 2012 dan memutuskan untuk mengambil bidang studi Sistem Pengaturan.

--halaman ini sengaja dikosongkan--